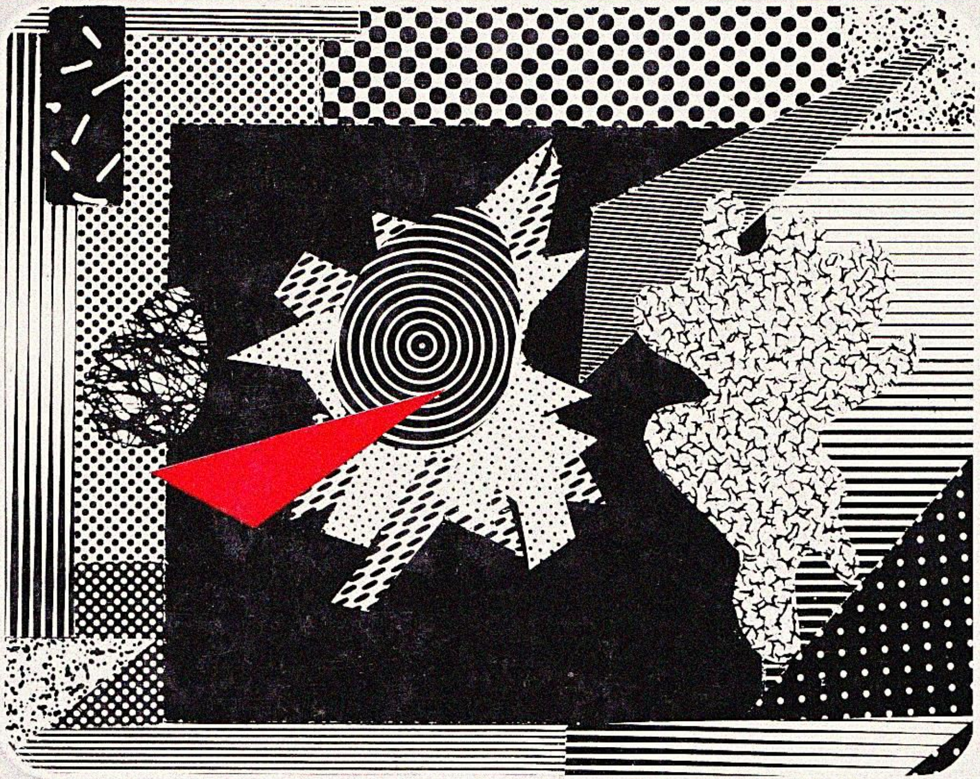
سلسلة الثقافة المميزة
13

روجر بنروز
أستاذ رياضيات في جامعة اكسفورد

العقل والحاسوب وقوانين الفيزياء



ترجمة: محمد وائل الأتاسي
د. بسام المعصراني

المعهد العالي للعلوم التطبيقية والتكنولوجيا

بسم الله الرحمن الرحيم

دار طلاس

للدراسات والترجمة والنشر

دمشق - اوتستراد المزة. ص.ب: ١٦٠٣٥

هاتف : ٦٦١٨٠١٣ - ٦٦١٨٩٦١

تلفاكس : ٦٦١٨٨٢٠ - برقياً : طلاسدار

الطبعة الأولى - ١٩٩٨

المعهد العالي للعلوم التطبيقية والتكنولوجيا

صدر هذا الكتاب بالتعاون مع المعهد العالي للعلوم التطبيقية والتكنولوجيا بدمشق

سلسلة
الثقافة
المميزة
13

روجر بنروز

أستاذ رياضيات في جامعة اكسفورد

العقل والحاسوب
وقوانين الفيزياء

تصدير بقلم
مارتن غاردنر

ترجمة: محمد وائل الأتاسي

د. بسام المعصراني

مراجعة: د. محمد المراياتي

عنوان الكتاب باللغة الانكليزية

The Emperor's New Mind

Concerning Computers, Minds, and The Laws of Physics

ROGER PENROSE

Rouse Ball Professor of Mathematics
University of Oxford

Foreword by
MARTIN GARDNER

PENGUIN BOOKS

العقــــل و الحاسـوب و قـوانيــن الفيزيــاء

روجـر بنــروز هـو أسـتاذ الرياضيــات بلقـب روز بـول في جامعة أكسفورد، حائـز على عدد من الجوائز والمكافآت بما فــي ذلـك جـائزة ولـف Wolf لعــام 1988 التــي تقـاســـمها مــع ســتيفن هوكنـغ تقديـراً لـهمـا علـى مسـاهمتهما المشـتركة في تطوير فهمنا للكون.

العقل والحاسوب وقوانين الفيزياء = The emperor's new mind / روجـر بـنروز؛ تصديـر بقلم مارتن غاردنر؛ ترجمة محمد وائل الأتاسي؛ بسام المعصراني؛ مراجعة محمد المرايـاتي .ـ دمشق: دار طلاس، ١٩٩٨. ـ ٥٤٤ ص: مص؛ ٢٥سم . ـ (سلسلة الثقافة المميزة ؛ ١٣).

١ ـ ٥١٩،٤ ب ن ر ع
٢ ـ ٥٣٠ ب ن ر ع
٣ ـ العنوان
٤ ـ العنوان الموازي
٥ ـ بنروز
٦ ـ الأتاسي
٧ ـ المعصراني
٨ ـ السلسلة

مكتبة الأسد

رقم الايداع : ٢٠٥٠/١١/١٩٩٧ رقم الاصدار ٧٦٠

رقـم: ٣٩٩٠٣
تاريخ: ١٩٩٧/٥/١٩

كلمة المترجمين

نضع بين يدي القارئ العربي كتاباً متميزاً نال منذ صدوره شهرة كبيرة. فهو كتاب علمي بقدر ماهو فلسفي، جدي بقدر ماهو ممتع، شامل بقدر ماهو عميق. سعى كاتبه - الرياضي الفيزيائي المعاصر الشهير روجر بنروز- إلى تفنيد الآراء التي تتحدث عن ذكاء اصطناعي وبيّن أن التفكير الإنساني يتمتع بميزات كثيرة أهمها الشعور (أو الوعي) الذي لايمكن للفيزياء في وضعها الراهن أن تفسره، ولا للآلة أن تقلده. وقد رأى المؤلف أنه لابد، لكي يثبت لنا ذلك، من أن يأخذنا في جولة استغرقت منه عشرة فصول مليئة بالمعلومات الشائقة المتنوعة التي قلما أتيح لكاتب أن يجمعها أو لكتاب واحد أن يضمها بين دفتيه. فهي تتضمن إلى جانب المعلومات الفيزيائية المتنوعة معلومات عن الرياضيات وفلسفتها وعلم الكون وتنبؤاته وبنية الدماغ وفيزيولوجيته والحواسيب ومبادئها الأساسية...

وقد حاولنا أن نتوخى الدقة والوضوح في الترجمة، ورأينا من الأنسب استخدام الرموز اللاتينية (واليونانية) في المعادلات والعلاقات لأنها الرموز المستخدمة عالمياً. كما راعينا ذكر أسماء الأعلام بأصولها الأجنبية (لأول مرة ترد فيها على الأقل). وقد صادفتنا بعض المصطلحات التي لم يسبق، بحسب علمنا، أن وضع لها مقابل بالعربية. مثال ذلك كلمة soluble ترجمناها: حَلول، بمعنى قابل للحل، (وأخذنا منها المصدر الصناعي حلولية كمقابل لكلمة solubility). وقياساً على ذلك ترجمنا recursive كَرور و computable حَسوب و countable عَدود و undecidable لابتوت ...إلخ.

ونود أن ننوه إلى أننا ترجمنا كلمة consciousness غالباً بكلمة شعور وذلك جرياً على مادرج عليه أساتذة علم النفس (ولاسيما الدكتور سامي الدروبي)، كما ترجمناها أحياناً بكلمة وعي، علماً أنه لابد من التمييز بين كلمتي consciousness و awareness اللتين تعنيان الشيء نفسه تقريباً وإن كانت كلمة consciousness تفيد معنى أكثر إيجابية (كما أشار المؤلف إلى ذلك). وقد استعمل المؤلف أحياناً التعبير conscious awareness الذي ترجمناه الوعي الشاعر أو الوعي الشعوري.

وقد أضفنا بعض الملاحظات والشروح، التي رأينا أنها يمكن أن تساعد القارئ، وأوردناها على شكل حواشٍ في أسفل الصفحات وأشرنا إليها بإحدى الإشارتين × أو † تمييزاً لها عن حواشي المؤلف التي أشير إليها بالإشارة *.

تصديـــــر

بقلم مارتن غاردنر Martin Gardner

يرى كثير من الرياضيين والفيزيائيين الكبار أن من الصعب، إن لم يكن من المستحيل، تأليف كتاب يسهل على غير الممتهنين فهمه. وكنا حتى صدور هذا الكتاب نستطيع أن نفترض أن روجر بنروز (وهو من أحسن رجالات العالم اطلاعاً وابداعاً في الفيزياء والرياضيات) هو من هؤلاء - وإن كان الذين قرؤوا منا مقالاته ومحاضراته غير الاختصاصية أعرف بحقيقته. ومع ذلك فقد كان بذل بنروز لجزء من جهوده في تأليف كتاب رائع موجه للناس العاديين المتعلمين، مفاجأة سارة. فهو، كما أعتقد، سيصبح كتاباً كلاسيكياً

إن قضية هذا الكتاب الأولى هي مايدعوه الفلاسفة قضية "العلاقة بين العقل والجسم"، على الرغم من أن فصوله تقوم بجولة واسعة تمتد من النظرية النسبية ونظرية الكم حتى الكوسمولوجية. فمؤيدو الذكاء الاصطناعي Artificial Intelligence (AI)، بمعناه القوي، يحاولون منذ عدة عقود إقناعنا بأن المسألة كلها لن تعدو قرناً أو قرنين (بل إن بعضهم خفضها إلى خمسين سنة)، حتى تقوم الحواسيب الإلكترونية بكل مايمكن لعقل الإنسان أن يقوم به من أعمال! فهم مقتنعون بدافع من حماس الشباب وقراءاتهم لقصص الخيال العلمي بأن عقولنا ليست سوى "حواسيب مصنوعة من اللحم" (كما ذكر مرة م.مينسكي Marvin Minsky)، وأنه من الأمور المسلم بها أن السرور والألم وتقدير الجمال وروح الدعابة والشعور وحرية الإرادة هي قابليات ستظهر بصورة طبيعية حين يصبح الإنسان الآلي الإلكتروني معقداً إلى الدرجة الكافية في سلوكه الخوارزمي

إن هذا مايعارضه بشدة بعض فلاسفة العلوم (ولاسيما جون سيرل John Searle الذي يناقش بنروز بعمق تجربته الشهيرة "تجربة غرفة التفكير الصينية"). ففي نظر هؤلاء لايختلف الحاسوب في أساسه عن الحاسب الآلي الذي يعمل بالعجلات أو بالروافع أو بأي شيء ينقل الإشارات (فيمكن تصميم حاسب يعمل بالكريات

المتدحرجة، أو بالمياه الجارية داخل أنابيب). ولكن انتقال الكهرباء داخل الأسلاك أسرع من انتقال أي شكل آخر للطاقة (ماعدا الضوء)، مما يجعلها أسرع بكثير من الحاسب الآلي في تداول الرموز، وبالتالي في معالجة قضايا فائقة التعقيد. ولكن هل الحاسوب الإلكتروني "أوعى" لما يفعله من المعداد؟ فحواسيب اليوم تلاعب أبطال الشطرنج، ولكن هل تفهم ماهية اللعب نفسه؟

إن أقوى هجوم كتب حتى الآن بحق الذكاء الاصطناعي هو كتاب بنروز هذا. وكانت الاعتراضات قد وجهت في القرون الماضية إلى الفكرة التبسيطية القائلة إن العقل ليس سوى آلة تُسيِّر عملها قوانين فيزيائية معروفة. إلاّ أن هجوم بنروز أكثر اقناعاً، لأنه يعتمد على معلومات لم تكن متاحة للباحثين السابقين. وعلاوة على ذلك يُظهر لنا هذا الكتاب بأن بنروز هو أكثر من فيزيائي رياضي، إنه فيلسوف أيضاً من الدرجة الأولى فهو لايخشى التصدي لقضايا يميل فلاسفة معاصرون إلى رفضها باعتبارها عديمة المعنى.

فهو يملك الجرأة على تأكيد واقعية صلبة، مخالفاً بذلك تلك الفئة القليلة من الفيزيائيين التي ترفضها. ويرى أن العالم ليس وحده هو الذي له وجود خارج ذواتنا بل إن الحقيقة الرياضية لها أيضاً استقلالها الغامض الخارج عن الزمان. ثم إن بنروز يملك، مثل نيوتن وأينشتين، شعوراً عميقاً بالتواضع والرهبة تجاه العالم الفيزيائي وواقعية الرياضيات البحتة الأفلاطونية. وكما أن بول إيردوس Paul Erdös (وهو عَلَم من أعلام نظرية الأعداد) يحب الحديث عن "الكتاب الإله" الذي سجلت فيه أحسن البراهين، ويتاح للرياضيين من حين لآخر أن يقع نظرهم على جزء من صفحاته، يعتقد بنروز أيضاً أنه حين يطلق الفيزيائي أو الرياضي صرخة إلهام مفاجئ، تكون هذه الصرخة أكثر من مجرد شيء "يتوصلون إليه عن طريق الحساب المعقد"، إنها لحظة اتصال العقل بالحقيقة الأزلية الموضوعية. فهو يبدي عجبه كيف يمكن لعالم أفلاطون والعالم الفيزيائي (الذي حلله الفيزيائيون الآن إلى رياضيات) هما حقاً شيء واحد أو الشيء نفسه؟

ولقد خصصت صفحات عديدة من كتاب بنروز لبنية شهيرة كسورية fractal إلى حد ما تدعى مجموعة ماندلبروت (نسبة إلى مكتشفها Benoit Mandelbrot). إن هذه البنى، على الرغم من تشابهها مع ذاتها بالمعنى الاحصائي، عندما تتوسع أجزاء منها،

فإن نماذج تلافها المحسوبة إلى مالا نهاية تظل تتغير بطريقة لايمكن التنبؤ بها. ويرى بنروز (كما أرى أنا) أنه من غير المفهوم كيف يمكن لشخص ما أن يفترض أن هذه البنية الغريبة ليست موجودة "هناك"، مثلها مثل قمة إفرست، لتكون موضعاً لاستكشافنا كما نستكشف غابة كثيفة.

ينتمي بنروز إلى قطاع عريض آخذ بالازدياد من الفيزيائيين الذين يعتقدون أن أينشتين لم يكن عنيداً أو مشوش الذهن حين قال إن خنصره قد أخبره بأن نظرية الكم ليست كاملة. ولكي يدعم بنروز هذا الرأي يأخذنا في جولة رائعة يجعلنا نكتشف فيها على التوالي مواضيع شتى: مثل الأعداد العقدية، وآلات تورنغ Turing ونظرية التعقيد Complexity theory، ومفارقات نظرية الكم المذهلة، والنظم الصورية، ولابتوتية غودل Gödel undecidability، وفضاء الطور، وفضاءات هلبرت، والثقوب السوداء، والثقوب البيضاء، وإشعاع هوكنغ Hawking radiation، والأنطروبية، وبنية الدماغ، ومواضيع أخرى كثيرة تقع في صميم التأملات الجارية حالياً. ترى هل "تشعر" القطط والكلاب بذواتها؟ وهل من الممكن نظرياً أن تنقل آلة إنساناً من مكان إلى آخر بأن تحوله إلى معلومات تنقلها بالأشعة كما ينقل رواد الفضاء في المسلسلات التلفزيونية التي تتحدث عن الرحلات بين النجوم؟ وماأهمية الشعور بالنسبة للإبقاء على الحياة، حتى يبتدعه التطور؟ وهل يوجد خلف ميكانيك الكم مستو يُطمس فيه اتجاه الزمان والتمييز بين يمين ويسار طمساً محكماً؟ وهل أن قوانين ميكانيك الكم، أساسية بالنسبة لعمل الدماغ؟ أم أن هناك قوانين أعمق منها تحكم عمله؟

يجيب بنروز عن السؤالين الأخيرين بـ "نعم": أما نظريته الشهيرة عن "اللاويات" twistors فلايمكن إيرادها في الكتاب لتقنيتها العالية. وهي تتحدث عن أشياء هندسية مجردة تعمل في فضاء معقد كثير الأبعاد يمتد خلف المكان-الزمان. وقد بذل فيها بنروز جهوده على مدى عقدين لكي يسبر منطقة أعمق من حقول ميكانيك الكم وجسيماته. ومع ذلك، حين صنف النظريات في أربع فئات، هي الفخمة والمفيدة والتلمسية والضالة، وضع بنروز نظرية اللاويات بتواضع في الفئة الثالثة إلى جانب نظرية الأوتار الفائقة ونظريات التوحيد الكبير الأخرى التي تناقش اليوم نقاشاً حاراً.

لقد احتل بنروز منذ عام 1973 منصب استاذ رياضيات بلقب " روز بول " في جامعة اوكسفورد . وهذا اللقب مناسب له ، لأن روز بول W.W. Rouse Ball لم يكن

رياضياً مرموقاً فحسب، بل كان هاوي سحر أيضاً، فقد وجه إهتماماً حاراً لرياضيات التسلية، وألف فيها الكتاب الانكليزي الكلاسيكي "تسليات ومقالات رياضية" Mathmatical Recreations and Essays، ويشاركه بنروز في حماسه هذا للعب، ففي شبابه اكتشف "كائناً مستحيلاً" سماه "tribar" وأعني بـ "كائن مستحيل" أنه يتكون من رسم شكل فراغي لايمكن أن يوجد لأنه يتضمن عناصر متناقضة ذاتياً. وقد حوله بعدئذ هو وأبوه، المختص بالوراثة، ليونيل Lionel إلى سُلّم بنروز Penrose Staircase، وهو بنية استخدمها م. إيشر Maurits Escher في رسم لوحتين ***الصاعد والنازل***" و "***مسقط المياه***". وحين كان بنروز مضطجعاً مرة في فراشه وهو فيما يدعوه "نوبة جنون"، تخيل شيئاً مستحيلاً في فضاء رباعي الأبعاد، وقال عنه إنه شيء لو التقاه كائن من كائنات الفضاء الرباعي لصرخ "ياإلهي ماهذا "؟

وحين كان بنروز يعمل في أعوام الستينيات مع صديقه س. هوكنغ Stephen Hawking في علم الكون توصل إلى ماقد يكون أحسن اكتشافاته وهو إذا ظلت النسبية العامة سارية "حتى النهاية"، فلابد أن تكون هناك "شذوذية" في كل ثقب أسود لاتعود تطبق فيها قوانين الفيزياء. وهذا الإنجاز، وإن كان قد أسدل عليه الستار في هذه السنوات الأخيرة ابتكار بنروز لشكلين يبلطان المستوي على طريقة ترصيعات إيشر، إلا أنهما لايبلطانه إلا بطريقة لادورية. (ويمكن للقارئ المهتم أن يطلع على المزيد حول هذين الشكلين المسليين في كتابي Penrose Tiles to Trapdoor Ciphers). وقد ابتكر بنروز هذين الشكلين، أو بالأحرى اكتشفهما، من دون أن يتوقع أن تكون لهما فائدة ما. ولكن تبين أمام دهشة الجميع أن الأشكال الثلاثية الأبعاد لبلاطتيه هاتين يمكن أن تكون في أساس نوع جديد غريب من المادة. واليوم، تكوِّن دراسة "أشباه البلورات" أحد أنشط مجالات البحث في علم البلورات. وهي أيضاً أكثر الأمثلة إثارة للدهشة في أيامنا هذه على إظهار الكيفية التي يمكن للرياضيات المسلية فيها أن تكون لها تطبيقات غير متوقعة.

إن اكتشافات بنروز في الرياضيات و الفيزياء – وقد عرضتُ جزءاً بسيطاً منها فقط – تنبع من إحساس رافقه مدى الحياة بالدهشة والإعجاب أمام سر الوجود وجماله. ذلك أن خنصره يخبره بأن عقل الإنسان أسمى من أن يكون مجرد مجموعة من الأسلاك والدارات الصغيرة . وما شخصية الولد آدم التي أوردها في فاتِحة هذا

الكتاب وخاتمته سوى رمز، إلى حد ما، لظهور الشعور (لدى الكائنات الحية) في أثناء تطور الحياة الحاسة البطيء. وأنا أرى أن بنروز هو أيضاً آدم نفسه – ذلك الطفل الجالس في الصف الثالث خلف زعماء الذكاء الاصطناعي – وهو الذي تجرأ على التصريح بأن أباطرة الذكاء الاصطناعي القوي لايرتدون ثياباً[†] . ومع أن جميع آراء بنروز متشربة بالدعابة إلا أن هذه بالذات ليست مادة للضحك.

[†] تلميحاً لقصة الولد الذي فضح الأكذوبة القائلة إن الملك يرتدي ثياباً غير مرئية (في قصة أندرسون الشهيرة: ملابس السلطان الجديدة The Emperor's New Clothes) والتي منها استمد الكتاب عنوانه الأصلي: The Emperor's New Mind.

كلمة موجهة إلى القارئ

حول قراءة المعادلات الرياضية

لجأت في أماكن عديدة من هذا الكتاب إلى استخدام الدساتير الرياضية، وكنت غير وجل ولامبالٍ بالتحذيرات المتكررة من أن كل دستور كهذا سيخفض عدد القراء إلى النصف. فإذا كنت، أيها القارئ، من هؤلاء الذين يجدون هذه الدساتير مخيفة (ومعظم الناس يجدونها كذلك)، عندئذٍ أنصحك بطريقة أتبعها أنا حين يصادفني سطر مزعجٍ يمكن أن يقطع علي متابعة القراءة. والطريقة هي أن نتجاهل تقريباً هذا السطر كلياً ونتجاوزه إلى السطر التالي. ولكن، ليس هذا بالتحديد ماأريده، بل على المرء أن يمرّ على الدستور البائس بنظرة شاملة بدلاً من التمعن فيه ثم يتابع قدماً. فإذا تسلح بعد قليل بثقة جديدة، أمكنه العودة إلى الدستور المهمل ومحاولة تفهم بعض سماته البارزة، لأن النص نفسه يمكن أن يساعد على معرفة مايهم في الدستور ومايمكن بكل طمأنينة إهماله فيه. أما إذا لم يستطع فليس عليه أن يخشى العاقبة إذا ما خلفه وراءه كلياً.

اعتـراف بالجميــل

اني مدين بالشكر لأولئك الذين ساعدوني بطريقة أو بأخرى بتأليف الكتاب وهم كثر. ومن بينهم بوجه خاص أولئك المؤيدون للذكاء الاصطناعي القوي (ولاسيما الذين شاركوا في برنامج تلفزيوني شاهدته مرة في الـ BBC). فقد دفعني هؤلاء بتعبيرهم عن تلك الآراء المتطرفة عن الذكاء الاصطناعي إلى البدء بهذا المشروع منذ عدة سنوات مضت (ومع ذلك، لو أني كنت أعلم مقدار الجهد المقبل الذي سترميني فيه الكتابة، لساورني شعور أحس به الآن أني ماكان يجب أن أبدأ). وأنا أقدم شكري أيضاً للأشخاص العديدين الذين قرؤوا أقساماً صغيرة معدلة من المخطوط، وزودوني باقتراحاتهم التي كانت خير معين لي على تحسين الكتاب. وهم: David Deutschctoby Bailey (الذي أعانني كثيراً بتدقيق المواصفات التي خصصتها لآلة تورنغ) Agnus ،Lane Hughston ،Jim Hartle ،Stuart Hampshire Toby ،Eric Penrose Ted Newmam ،Tristan Needham ،Mary Jane Mowat ،McJntyre Dennis Sciama ،Eengelbert Schücking ،Wolfgang Rindler ،Penrose. وأقدر بوجه خاص مساعدة كريستوفر بنروز لمعلوماته المفصلة عن مجموعة مندلبروت. وكذلك كانت مساعدة جوناثان بنروز لمعلوماتها المفيدة في الحواسيب الشطرنجية. وأوجه شكري الخاص إلى Colin Blakemore، و Erich Harth، و David Hubel لقراءتهم الفصل التاسع وتدقيقه، فهو الفصل المتعلق بالدماغ، وهذا الموضوع لست خبيراً فيه، وعلى رغم ذلك ليسوا مع الآخرين (الذين أشكرهم) مسؤولين عن ما بقي من أخطاء. وأشكر NSF لدعمهم لي بموجب العقود DMS 84-05644 و DMS 86-06488 و PH 86-12424. وأنا مدين بالكثير أيضاً لِـ "مارتن غاردنر" لكرمه الفائق لتقديمه هذا الكتاب ولبعض التعليقات الخاصة أيضاً. وأوجه شكري الخاص جداً لعزيزتي فانيسا Vanessa لنقدها المفصل والمتأني لمختلف الفصول، ولتزويدي الذي لايقدر بالمراجع، ولصبرها معي حين أكون في وضع لايطاق – ولدعمها وحبها العميقين لي حين كنت بأمس الحاجة إليهما.

الفهرس

الفصل الرابع: الحقيقة والبرهان والبصيرة

الفصل الخامس: العالم الكلاسيكي

الفصل السادس: سحر النظرية الكمومية وغموضها

الفصل السابع: الكوسمولوجية (علم الكون) وسهم الزمن

الفصل الثامن: البحث عن الثقالة الكمومية

الفصل التاسع: الأدمغة الحقيقية ونماذجها

الفصل العاشر: أين تكمن فيزياء العقل؟

فاتحـــــة

كان هناك تجمع كبير في قاعة المحاضرات الضخمة استعداداً لتدشين الحاسوب "أولترونيك" الجديد. وكان الرئيس بولو Pollo قد انتهى من كلمته الافتتاحية، وقد بدا عليه السرور من انتهاء مهمته تلك، فهو لم يكن يحب كثيراً مثل هذه المناسبات، وفضلاً عن ذلك كان لايعرف شيئاً عن الحواسيب، سوى أن الحاسوب سيوفر له في المستقبل كثيراً من الوقت. فقد طمأنه صانعو "أولترونيك" أن من بين مهمات هذا الحاسوب أنه سيتولى عنه اتخاذ جميع القرارات المربكة ذات الشأن التي كان يجدها مضجرة جداً. فمن المفروض في الحاسوب إذن أن يقوم بهذه المهمة نظراً لمقدار الذهب الذي صرف عليه، لاسيما أنه كان يأمل أن يكون قادراً على التمتع لساعات كثيرة يلعب فيها الغولف على المضمار الفخم الذي كان يملكه، فهو واحد من تلك المساحات الواسعة القليلة التي بقيت خضراء في بلده الصغير.

كان آدم يشعر بأنه محظوظ لكونه من بين من يشاركون في هذا الاحتفال. وكان يجلس في الصف الثالث، وأمامه بصفين، أمه، وهي من كبار الفنيين الذين ساهموا في تصميم أولترونيك. وبالمصادفة كان والده، على رغم كونه غير مدعو، هناك أيضاً في آخر القاعة، ولكنه محاط تماماً بالحرس الأمني لأنه كان يحاول في الدقيقة الأخيرة نسف الحاسوب، فقد أخذ على عاتقه القيام بهذه المهمة بصفته الرئيس الروحي – وهي صفة أعطاها لنفسه بنفسه – لجماعة صغيرة من المتطرفين النشطين اسمها "الهيئة العليا للشعور النفسي". وقد اكتُشف طبعاً هو وكل متفجراته في الحال بوساطة الكواشف الإلكترونية والكيميائية الكثيرة المنتشرة في كل مكان. وقد فُرض عليه أن يشاهد الاحتفال ليكون ذلك جزءاً صغيراً من العقاب الذي ينتظره.

كان آدم فاتر العاطفة نحو والديه. ولربما كانت هذه المشاعر غير ضرورية بالنسبة له. فلقد رُبي طيلة سنوات عمره الثلاث عشرة في وسط مادي مترف جداً يتألف جميعه تقريباً من الحواسيب. فكان باستطاعته، بمجرد لمسة زر، أن ينال كل مايتمناه من الطعام والشراب والرفيق والتسلية. إضافة إلى التعليم الذي كان يحصل عليه كلما شعر بالحاجة إليه – وكان كله موضحاً بالرسوم الجذابة الملونة المعروضة أمامه. وكان هذا كله بفضل مركز أمه والوظيفة التي تحتلها.

كان المصمم الرئيسي على وشك أن ينهي **حديثه** الآن عندما قال "... إن فيه أكثر من 10^{17} وحدة منطقية. وهذا يتجاوز عدد العصبونات في مجمل أدمغة كل من في بلدنا بأسره! ولايمكن تصور ذكائه. ولكن لسنا لحسن الحظ بحاجة لتصوره، بل سيسعدنا الحظ بعد هنيهة بأن نكون بأنفسنا شاهدين على هذا الذكاء. إني أدعو السيدة الأولى المحترمة في بلدنا العظيم: السيدة إزابيلا بولو لتدير المفتاح الذي يشغل حاسوبنا الرائع أولترونيك."

تقدمت زوجة الرئيس وهي متوترة الأعصاب بعض الشيء ثم أدارت المفتاح وهي مرتبكة قليلاً. فعم الصمت، وخفتت شدة الأضواء بصورة تكاد لاتلحظ، فقد بدأت 10^{17} وحدة منطقية عملها. وكان كل إنسان ينتظر غير عارف تماماً بما ينتظره. وهنا سأل المصمم الرئيسي: "هل بين الحاضرين من يرغب بتدشين حاسوبنا الجديد أولترونيك، بتوجيه أول سؤال إليه؟" وأحس كل واحد بالحرج خوفاً من أن يبدو غبياً أمام هذا الحشد – وأمام هذا الوجود الطاغي الجديد. كان الصمت مخيماً ثم ناشدهم المصمم الرئيسي "حتماً لابد أن أحدكم يرغب"! لكن الجميع كانوا خائفين، يبدو عليهم أنهم يستشعرون شعوراً جديداً كلي القدرة. لكن آدم لم يكن يشعر بمثل رهبتهم، فقد ترعرع منذ ولادته بين الحواسيب. وكان يعرف تقريباً ما الذي يمكن أن يكون عليه شعور كيان ما ***إذا كان*** حاسوباً. أو على الأقل، كان يظن أن لديه فكرة عن ذلك. ومهما يكن من أمر، فقد أثاره الفضول ورفع يده. فقال رئيس المصممين " آه نعم، الشاب الصغير في الصف الثالث. هل لديك سؤال توجهه لـ ـ إه ـ لصديقنا الجديد؟"

أمن الممكن أن يكون للحاسوب عقل ؟

مدخـــل

لقد خطت صناعة الحواسيب الإلكترونية على مدى العقود القليلة الماضية خطوات واسعة . وعلاوة على ذلك نكاد لا نشـــك بأن مزيدا من التقدم العظيم ستشهده العقود القادمة ، سواء أفي سرعة الحواسيب ، أم في قدرتها ، أم في تصاميمها المنطقية ، حتى ليجوز أن تبدو لنا حواسيب اليوم كسولة بدائية مثلما تبدو لنا الآن حواسيب الأمس الميكانيكية . إن الحواسيب الحالية قادرة على إنجاز مهمات عديدة ، و بسرعة ودقة تفوقان أي شيء يستطيع أن ينجزه الإنسان . وكانت هذه المهمات في السابق مقصورة على مجال تفكير الإنسان . وقد اعتدنا لفترة طويلة على الآليات التي تتفوق علينا بسهولة بإنجازاتها في النواحي ***الجسدية*** . الأمر الذي لم يسبب لنا أي ضيق أو ألم ، بل على العكس ، ينتابنا السرور حين نمتلك أدوات تسير بنا بانتظام بسرعة كبيرة على الأرض ــ كأن تكون أسرع بأكثر من خمس مرات من أسرع رياضي عداء ــ أو تحفر حفرا أو تهدم أبنية غير مرغوب فيها بسرعة يمكن أن تخجل مجموعة من عشرات الرجال . بل إنه ليسعدنا جدا أن يكون لدينا آلات تمكننا من القيام جسديا بأعمال لم يكن باستطاعتنا أبدا القيام بها من قبل ، كأن تطير بنا في السماء وتضعنا بعد بضع ساعات في الطرف الآخر من المحيط . إن هذه المنجزات لا تنال من غرورنا . ولكن القدرة على ***التفكير*** كانت دوما امتيازا إنسانيا بحتا . إذ أليست هذه المقدرة على التفكير هي التي مكنتنا عند ترجمتها إلى واقع فيزيائي ، من رفع محدوديتنا الجسدية ، ووضعتنا في مكانة بدت لنا أعلى مرتبة من رفاقنا من المخلوقات . فإذا استطاعت الآلات يوما أن تتفوق علينا في هذه الصفة الهامة التي مكنتنا من الاعتقاد بأننا نحن الأسمى ، أفلن يكون علينا عندئذ أن نتنازل لمبتكراتنا عن هذا التفوق الوحيد؟.

إن تساؤلنا : هل يمكن أن يقال يوماً ما عن آلة ميكانيكية إنها تفكر ــ أو ربما تحس بالمشاعر أو أن لها عقلاً ــ ليس بالتساؤل الجديد حقاً (1). وإنما اكتسب دفعا جديدا و أهمية ملحة أيضا بعد ظهور تقانة الحاسوب الحديثة . الأمر الذي يجعلنا نتطرق لقضايا فلسفية عميقة مثل : ماذا يعني أننا نفكر أو نشعر ؟ ما هو العقل ؟ هل العقول موجودة حقا ؟ ثم على فرض أنها موجودة، إلى أي مدى ترتبط وظيفيا بالبنى الفيزيائية المرافقة لها ؟ وهل يمكن للعقول أن توجد بصورة مستقلة تماما عن مثل هذه البنى ؟ . أو هل أن العقول هي مجرد عمليات تشغيل

(لأنواع مناسبة) من البنى الفيزيائية ؟ وهل من الضروري ، على كل حال ، أن تكون البنى ذات العلاقة , بنى بيولوجية بطبيعتها (أي أدمغة) ؟ أم يمكن للعقول أن تقترن أيضا بقطع من تجهيزات إلكترونية ؟ وهل تخضع العقول لقوانين الفيزياء ؟ ***وما هي بالضبط قوانين الفيزياء ؟*** .

تلك نماذج من القضايا التي سأحاول طرحها في هذا الكتاب . وهي كما نرى مسائل ضخمة ، ومطالبتنا بإجابة نهائية عنها مسألة عسيرة جدا . وأنا لا أستطيع إعطاء هذه الإجابة حتى ولا أي إنسان غيري , على الرغم من أن بعضهم قد يحاول التأثير فينا بتخميناته . أما تخميناتي أنا فسيكون لها دور مهم تقوم به في ما يلي . ولكنني سأحاول التمييز بوضوح بين تأملاتي من جهة، والحقائق الفيزيائية الثابتة من جهة أخرى ، كما أنني سأحاول إيضاح الأسباب الكامنة وراء هذه التأملات . على أن غايتي هنا ليست الاهتمام كثيرا بمحاولة تخمين الإجابة، بل هي بدلا من ذلك، إثارة بعض القضايا الجديدة فعلا ، المتصلة بالعلاقة بين بنية القانون الفيزيائي وطبيعة الرياضيات و التفكير الواعي، وأن أعرض وجهة نظر لم أر أحدا قد عبر عنها من قبل . ولكني لا أستطيع وصفها وصفا كافيا ببضع كلمات، الأمر الذي كان سببا لرغبتي في أن أعرض الأمور في كتاب بهذا الحجم . ولكني أستطيع أن أقول ، على الأقل باختصار ، **وربما بشيء من عدم الوضوح** ، أن وجهة نظري تؤدي إلى أن افتقارنا الحالي إلى فهم قوانين الفيزياء الأساسية هو الذي يمنعنا من التوصل إلى التعبير بكل وضوح عن مفهوم العقل بلغة الفيزياء أو المنطق. و لا أعني بذلك أن القوانين لن تكون أبدا تلك التي نعرفها جيدا، بل على العكس ، إن مما يهدف إليه هذا الكتاب هو محاولة دفع البحث في المستقبل في اتجاهات تبدو واعدة في هذا الميدان ، أو هو محاولة لصياغة بعض المقترحات المحددة بكل عناية و الجديدة فعلا بشأن المكان الذي يجب أن يشغله العقل في إطار تطور الفيزياء كما نعرفها.

وهنا ، علي أن أوضح أن وجهة نظري ليست مألوفة في أوساط الفيزيائيين ، و لا يرجح إذن أن يقبلها في الوقت الراهن علماء الحواسيب والفيزيولوجيون . بل سيصرح معظم الفيزيائيين أن القوانين الأساسية العاملة على صعيد دماغ الإنسان ، كلها معروفة بإتقان ، و إن كانوا لا يمارون طبعا بأنه لا تزال هناك ثغرات عديدة في معرفتنا عن الفيزياء عامة . من ذلك مثلا أننا لا نعرف القوانين الأساسية التي تحدد قيم كتل الجسيمات تحت الذرية في الطبيعة وشدات التأثيرات المتبادلة بينها . ولا نعرف كيف نجعل نظرية الكم متسقة كل الإتساق مع نظرية أينشتين النسبية الخاصة ـــ هذا فضلا عن أننا لا نعرف كيف نصوغ نظرية " الثقالة الكومية " التي ستجعل نظرية الكم متسقة مع نظرية النسبية ***العامة*** . الأمر الذي يترتب عليه عدم فهمنا لطبيعة الفضاء على مستوي الأبعاد التي لا يمكن تصور ضآلتها والبالغة 1/100000000000000000000:من أبعاد الجسيمات الأساسية المعروفة . هذا ، مع أن معرفتنا على مستوى أبعاد أكبر من هذه هي معرفة كافية كما نفترض. ثم إننا لا نعرف هل الكون بمجموعه منته في امتداده أم أنه غير منته ـــ سواء أفي المكان أم في الزمان ـــ ومع كل ذلك قد

يبدو للبعض أن هذه الشكوك لا صلة لها من أي نوع كان بالفيزياء على صعيد الإنسان . كما أننا لا نفهم الفيزياء التي يجب أن تعمل عملها في قلب الثقب الأسود ، ولا في بدء الانفجار الأعظم للكون نفسه. ومع ذلك تبدو هذه القضايا كلها، على قدر ما يتخيل الإنسان، بعيدة عن مستوي حياتنا اليومية (أو الأصغر من ذلك بقليل) ، الذي له صلة بعمل دماغ الإنسان. إنها بعيدة عنه ، وهذا مؤكد ! ولكني سأحاول أن أثبت أن لدينا مساحة واسعة أخرى من الجهل في فهمنا الفيزيائي على هذا المستوي **بالتحديد** ، الذي قد يكون فعلا هو المستوي الذي يشتغل فيه تفكير الإنسان وشعوره، وهو شيء يحدث تحت أنوفنا (أو بالأحرى خلفها)! وهو أيضاً ، كما سأحاول أن أوضح، جهل لا يعترف به أكثر الفيزيائيين . بل سأحاول أكثر من ذلك ، أن أثبت ــ وهذا ما يلفت النظر حقاً ــ أن الانفجار الأعظم والثقوب السوداء **لها صلة فعلا** بهذه المسألة (مسألة تفكير الإنسان وشعوره).

سأسعى في ما يلي أن أقنع القارئ بقوة الدليل الكامنة في وجهة النظر التي سوف أعرضها. ولكننا سنجد أمامنا عملا كثيرا يجب القيام به لكي نفهم وجهة النظر هذه . فسنحتاج للسفر عبر أراض غريبة جدا ــ بعضها فيما يبدو ليس على صلة واضحة بموضوعنا ــ وعبر مجالات للسعي عديدة متباعدة . كما سنحتاج إلى فحص بنية النظرية الكمومية أو أسسها وأحاجيها ، وإلى فحص السمات الأساسية لكلا النسبيتين الخاصة والعامة ، وللثقوب السوداء والانفجار الأعظم ، وقانون الترموديناميك الثاني ونظرية مكسويل في الظواهر الكهرطيسية ، كما سنفحص بالمثل أسس ميكانيك نيوتن . وسيكون لبعض المسائل الفلسفية والنفسية دور بارز تقوم به عندما نصل إلى محاولة فهم طبيعة الشعور ووظيفته . وسيكون علينا طبعا إلقاء لمحة بسيطة على فيزيولوجية الدماغ العصبية الراهنة ، إضافة إلى إلقاء لمحة على نماذج مقترحة للحاسوب . وسنحتاج إلى فكرة بسيطة عن الوضع الراهن للذكاء الاصطناعي، ولمعرفة ما هي آلة تورنغ Turing †، ولفهم معنى الحسوبية †† ومضمون نظرية غودل Godel ونظرية التعقيد. كما سنكون بحاجة أيضا للتنقيب في أسس الرياضيات ، وحتى لوضع طبيعة الواقع الفيزيائي نفسها موضع تساؤل.

وإذا ظل القارىء في نهاية كل ذلك غير مقتنع بهذه الحجج غير التقليدية التي أحاول هنا أن أوضحها ، فليس لي إلا أن آمل على الأقل بأن يخرج بشيء ذي قيمة أصيلة (صادقة) من هذه الرحلة ذات الطرق المتعرجة التي أتمنى أن تكون ، رغم ذلك، خلابة.

---

† آلان تورنغ. Alan Turing

†† الحسوبية computability : هي قابلية الحساب.

اختبار تورنغ

دعونا نتصور أن نموذجاً جديداً من الحواسيب قد نـزل إلى السـوق . وليكـن اتسـاع مخـزن ذاكرته وعدد وحداته المنطقيه يتجاوز ما في دماغ الإنسان. ولنفرض أيضاً أن هـذه الآلات قـد برمجت ولقمت بكل عناية بكميات كبيرة من البيانات من نوع مناسب . إن الصانعين يدعـون أن هذه الآلات ***تفكر فعلا***. بل ربما يدعون أيضا أنها ذات ذكاء أصيل . أو ربما ذهبوا إلى أبعـد من ذلك و أوحوا لنا بأن هذه الآلات ***تشعر فعلا*** ـ بالألم ، والسعادة، بالضيق والزهو....إلخ. ـ وأنها واعية لهذه المشاعر، ***وتفهم*** ما تفعله. فادعاؤهم هذا يبدو منه في الحقيقة أن هـذه الآلات صُنعت ***لتمتلك الشعور***.

ترى كيف نسـتطيع أن نتـأكد مـن أن علينـا تصديـق الصـانع في ادعاءاتـه أو تكذيبـه ؟ في العادة، عندما نشتري آلية من الآليات ، نحكم على صلاحيتهـا مـن الخدمـات الـتي تقدمهـا لنـا فحسب . فإذا أنجزت مهامها على نحو مرض قبلنا بها وكنا راضين مسرورين. أمـا إذا لم تنجـز مهامها ، أعدناها للإصلاح أو لإبدالها . فلكي نختبر ادعاء الصانع بأن هذا الحاسوب يملك فعـلا صفات الإنسان المذكـورة ، مـا علينـا بحسـب هـذا المعيـار إلا أن نطـالب بـأن ***يسلك سلوك*** الإنسان في هذا المجال . فإذا قام بذلك على نحو مرض قبلنا به ، ولن يكون لدينا سـبب للتذمـر من الصانع أو حاجة لإعادة الحاسوب للإصلاح أو الإبدال.

وهكذا تضع هذه الطريقة بين أيدينا وجهة نظر عملية جدا بالنسـبة لهـذه الأمـور . فـالرجل العملي يقول عن الحاسوب إنه ***يفكر*** إذا ***تصرف*** بطريقة لا تختلف عـن طريقـة الإنسـان عندمـا يفكر . والآن ، دعونا نتبنى وجهة النظر العملية هذه لبرهة مـن الزمـن .إن هـذا لا يعـني طبعـاً مطالبة الحاسوب بأن يزرع أرض الغرفة ذهاباً وإياباً كما يمكن للإنسان أن يفعل وهـو يفكـر ، قطعاً ، و لا أن نطالبه أيضاً بأن يبدو مثل الإنسان ويحس مثله عند لمسه . لأن هـذه صفـات لا صلة لها بأهداف الحاسوب . ولكن هـذا يعـني أن نطالبـه بالمقـابل بـأن يعطـي إجابـات شـبيهة بإجابات الإنســان عن كل سؤال يمكن أن نحرص على عرضه عليه ، ويعني أيضاً أننا لن نقر له بأنه يفكر فعلاً (أو يشعر، أو يفهم ... إلخ) إلا إذا أجاب عن أسئلتنا بطريقة لا يمكـن تمييزهـا عن طريقة الإنسان.

وقد ناقش ألان تورنغ وجهة النظر هذه ليدعمها بكل قـــوتـــه في مقالـة شـهيرة عنوانهـا (الآلات الحاسبة والذكاء)نشرت عـام 1950 في مجلـة فلسـفية اسمهـا Mind (Turing 1950) وسنسمع كثيراً عن تورنغ فيما بعد). ففي هذه المقالـة تم لأول مـرة وصـف تلـك الفكـرة الـتي تعرف الآن باسم اختبار تورنغ ، والغرض منها هو أن تكون اختبارا يحدد : هل من المعقول أن يقال عن آلة ما إنها تفكر . والآن دعونـا نفـترض أن حاسـوباً مـا (كذلـك الـذي يدعـو إليـه صانعو هذه الحواسيب في وصفهم أعلاه) زُعم أنـه يفكـر فعـلاً: ولنفـترض، تمشـياً مـع اختبـار

تورنغ ، أن الحاسوب ومعه متطوع ما من الرجال قد حُجبا معاً عن نظر محققة *(حادة الملاحظة)، وأن على المحققة أن تحاول أن تقرر أي الإثنين هو الحاسوب وأيهما هو الكائن الآدمي، وذلك من مجرد طرح أسئلة سابرة على كل منهما . وهذه الأسئلة وكذلك الأجوبة التي تتلقاها عنها ، وهي الأهم ، تُنقل كلها بطريقة غير شخصية ، كأن تضرب على لوحة مفاتيح آلة كاتبة ثم تُعرض على شاشة مهيأة لهذا الغرض ، ولا يسمح للمحققة بأي معلومات عن أي من الطرفين ، ما عدا تلك التي تحصل عليها فحسب من جلسة الأسئلة والأجوبة . فالرجل يجيب عن الأسئلة بكل صدق ويحاول أن يقنع المحققة بأنه ***هو فعلاً*** الكائن الآدمي وأن الآخر هو حاسوب. ولكن الحاسوب مبرمج كي " يكذب " وعلى نحو يحاول معه اقناع المحققة أنه هو الكائن الآدمي وليس الآخر .فإذا ظلت المحققة بعد سلسلة من الاختبارات غير قادرة على تحديد أي الطرفين هو الرجل الحقيقي بأي طريقة متسقة ، عُدَّ الحاسوب عندئذ (أو برنامج الحاسوب أو المبرمج ، أو المصمم .... إلخ) قد نجح في الاختبار.

ولكن يمكن بحسب ما سبق أن يحتج بعضهم بأن هذا الاختبار ليس عادلا كل العدل بالنسبة للحاسوب . إذ لو قلبت الأدوار وطلب إلى الرجل بدلا من الحاسوب أن يزعم أنه حاسوب ، وبُرمج الحاسوب بدلا من ذلك لكي يجيب بصدق ، لكان من السهل جدا على المحققة عند ذلك أن تجد أيهما هو هذا و أيهما هو ذاك ، لأن كل ما تحتاجه لذلك هو أن تطلب من المتسابق أن يقوم بعملية حساب معقدة . فالحاسوب الجيد سيتمكن من الإجابة بدقة في الحال، في حين أن الإنسان سرعان ما يرتبك. (على أنه قد يكون من الأفضل أن يتأنى المرء قليلا حيال هذا الأمر ، لوجود أناس " حسوبين استثنائيين " يستطيعون القيام بانجازات مذهلة جداً في الحساب العقلي بدقة لا تخطيء ومن دون جهد ظاهر .لدينا مثلا جوهان مارتن زخاريس داز (2) ، وهو ابن مزارع أمي ، عاش من 1824 إلى 1861 في ألمانية وكان قادرا على ضرب أي عددين كل منهما مؤلف من ثمانية أرقام في ذهنه في أقل من دقيقة ، أو ضرب عددين من عشرين رقماً في ما يقرب من ست دقائق ! و قد كان من السهل أن تخطيء المحققة فتظن أن الحسابات من صنع الحاسوب . ومن الإنجازات الحاسوبية الرائعة والأحدث عهداً ، إنجازات ألكسندرايتكن Alexander Aitken الذي كان أستاذا للرياضيات في جامعة إدنبره في الخمسينيات من هذا القرن ، وهناك آخرون. فيجب أن تكون المهمة الحسابية التي تختارها

---

* عند كتابة موضوع كهذا تصادفنا مسألة لا يمكن تجنبها وهي أن نقرر هل نستعمل الضمير "هو" أو "هي" في موضع لا شيء فيه ملزم ومقصود بالنسبة للجنس . وعلى هذا ، عندما نشير إلى شخص ما لا على التعيين ، سنستخدم من الآن فصاعدا "هو" فحسب لنعني بها "هي" أو "هو" الأمر الذي أتخذه على أنه الشيء العملي الطبيعي . ومع ذلك آمل أن أتمكن من نيل المعذرة لاستخدامي نوعا واحدا من الجنس في إبدائي تفضيل المرأة المحققة . فقد قدرت أن المرأة أقدر على الاستشعار من صنوها المقابل الرجل عند تعرّف الصفات الإنسانية الحقيقية.

المحققة للاختبار ، مرهقة أكثر من ذلك بكثير ، كأن تكون مثلاً ضرب عددين مؤلفين من ثلاثين رقما في ثانيتين ، وهذه مهمة سهلة ضمن قدرات حاسوب حديث جيد).

فمن مهام مبرمجي الحواسيب إذن أن يجعلوا الحاسوب يبدو أغبى مما هو بالفعل في بعض المجالات ، حتى إذا سألته المحققة سؤالا حسابيا معقداً على نحو ما رأينا أعلاه، زعم الحاسوب عندئذ ***أنه غير قادر*** على الإجابة ، وإلا فضح نفسه مباشرة . ولكني لا أصدق أن عملية جعل الحاسوب "غبياً" على هذا النحو هي مسألة ذات صعوبة خاصة تواجه مبرمجي الحواسيب ، وإنما الصعوبة الرئيسية ستكون في جعله يجيب عن نماذج من الأسئلة هي من أبسط أسئلة " الحس السليم " ــ وهي أسئلة لن يجد فيها الإنسان أية صعوبة على الإطلاق!

ولكننا سنواجه عندئذ مشكلة ذاتية تتمثل في إيراد أمثلة خاصة من هذا النوع. إذ مهما يكن السؤال الذي يمكن أن يقترحه المرء في أول الأمر ، فسيكون من السهل بعدئذ برمجة الحاسوب بصورة تجعله يجيب عن هذا السؤال الخاص كما يفعل الشخص . ولكن مهما كان افتقار الحاسوب للفهم ضئيلاً ، فمن المرجح أن ينكشف عجزه عن الفهم حين تطرح عليه جملة من الأسئلة المتتالية ، ولا سيما إذا كانت طبيعتها أصيلة وتتطلب فهما صحيحا . وتكمن مهارة المحققة جزئياً في كونها قادرة على ابتكار أسئلة من هذا النوع الأصيل ، وجزئياً أيضاً في كونها قادرة على متابعتها بأسئلة أخرى ذات طبيعة سابرة لكي تكشف هل "يفهم" المتحن فعلاً أم لا. ويمكنها أن تتعمد أيضاً طرح سؤال عارض تماماً لا معنى له لكي ترى هل يستطيع الحاسوب أن يكتشف الفرق.أو يمكنها أن تضيف سؤالا أو سؤالين يبدوان ظاهريا وكأنهما من دون معنى ، ولكنهما في الحقيقة يحملان معنى من نوع ما . فمثلاً. يمكنها أن تقول:" سمعت أن خرتيتا طار بمحاذاة نهر المسيسيبي في بالون زهري هذا الصباح فماذا تستنتج من ذلك؟" (وهنا يكاد المرء يتخيل قطرات العرق الباردة المتكونة على جبين الحاسوب ــ **هذا إذا أردنا استخدام أكثر الاستعارات تهكماً!**) وقد يجيب الحاسوب بتحفظ : "يبدو لي ذلك أقرب للسخافة ". فلا بأس بهذه الإجابة حتى الآن . فتردف المحققة "حقاً ؟ لقد قام عمي بذلك ذات مرة ــ وبالاتجاهين معاً ــ ولكن الخرتيت كان أبيض يميل إلى الصفرة ومخططاً، فما المضحك في ذلك؟ ".من السهل أن نتخيل أنه إذا لم يكن لدى الحاسوب "فهم" سليم ، عندئذ يمكن أن يسقط في الشرك بسرعة كاشفاً عن نفسه . ومن الجائز أيضاً أن يتعثر بالجواب "الخراتيت لا تستطيع الطيران"، إذ يسعفه مخزن ذاكرته بحقيقة أن الخراتيت لا تملك أجنحة ، هذا في الجواب عن السؤال الأول ، أو " ليس للخراتيت خطوط " في الجواب عن السؤال الثاني . فيمكن للمحققة أن تحاول مرة ثانية طرح سؤال ليس له معنى فعلاً. كأن تغير في السؤال الأول وتقول "***تحت المسيسيبي***" أو "***داخل بالون زهري***" أو "***في رداء ليلي زهري***" لكي تلاحظ إن كان لدى الحاسوب إحساس يتعرف به على الفرق الاساسي.

دعونا نتخلى لبعض الوقت عن التساؤل : هل من الممكن صنع حاسوب يستطيع النجاح في اختبار تورنغ أو متى يمكن ذلك ، ولنفرض بدلاً من ذلك أن آلات كهذه قد صنعت، وذلك بهدف المناقشة فحسب . والآن لا مانع من السؤال : ***هل من الضروري*** أن يقال عن الحاسوب الذي نجح في اختبار تورنغ إنه يفكر ويشعر ويفهم إلى آخر ما هنالك . إنني سأعود إلى هذه المسألة عما قريب . أما الآن ، فدعونا ننظر في بعض مضامين هذا الافتراض . فمثلاً إذا كان صانعو هذه الآلة محقين ***في أقوى ادعاءاتهم***، أي أن آلتهم هي كائن يفكر ويحس ويستشعر ويفهم ***ويعي***، فعندئذ سيورطنا شراؤنا لها في ***مسؤوليات أخلاقية*** . إنها ستورطنا ***حتماً*** إذا كان الصانعون صادقين ! إن مجرد تشغيل الحاسوب لتحقيق حاجياتنا بغض النظر عن حساسياته الخاصة ، هو عمل غير لا ئق . لأن ذلك لا يختلف من الوجهة الأخلاقية عن إساءة معاملة عبد من العبيد أو خادم .كما أن جعل الحاسوب يعاني من الألم الذي يدعي الصانعون أنه يشعر به هو عمل يجب تجنبه ، إن إقفال الحاسوب ، أو حتى ربما بيعه ، في الوقت الذي من الجائز أنه أصبح فيه متعلقا بنا ، سيضعنا في مشاكل أخلاقية . بل سيكون هناك عدد لا يحصى من المصاعب الأخرى التي هي من نوع تلك المصاعب التي نتورط فيها في علاقتنا مع الحيوانات أو مع الناس الآخرين . فكل هذه الأمور ستصبح ذات شأن بالغ. لذلك سيكون من الأهمية بمكان بالنسبة لنا أن نعرف (وكذلك بالنسبة للسلطات أن تعرف) هل ادعاءات الصانعين ـــ القائمة كما نفترض على تأكيدهم أن:

" كل آلة مفكرة، كانت قد اختبرت اختباراً شاملاً بطريقة تورنغ من قبل لجنة الخبراء في الشركة"
ـ هي ادعاءات صادقة فعلاً!

يبدو لي أنه على الرغم من الاستحالة الواضحة في بعض مضامين هذه الادعاءات ، ولا سيما مضامينها الأخلاقية ، فإن قضية اعتبارها النجاح في اختبار تورنغ مؤشراً سليماً على امتلاك الحاسوب للتفكير أو الذكاء أو الفهم أو الشعور ، ***هي في*** واقع الأمر قضية مقبولة بكل معنى الكلمة. إذ هل ثمة شيء آخر غير المحادثة نستطيع أن نكون به حكمنا بأن الأشخاص الآخرين لهم مثل صفاتنا ؟ في الحقيقة ***هناك معايير*** أخرى كتعابير الوجه وحركات الجسم والفعاليات عامة التي تؤثر بنا تأثيراً هاماً عند تكويننا هذه الأحكام. ولكننا نستطيع أن نتخيل أن إنساناً آلياً (ربما في زمن بعيد إلى حد ما في المستقبل) أمكن صنعه ويستطيع أن يقلد بنجاح جميع هذه التعابير والحركات. فعندئذ لن يكون ضرورياً إخفاء الإنسان الآلي والرجل الممتحن عن عيني المحققة ، ولكن المعايير التي تملكها المحققة تبقى نفسها كما كانت.

كما أن علي، من وجهة نظري ، أن أكون على استعداد للتخفيف كثيراً من مطالبي من آلة تورنغ . إذ يبدو لي أن طلبنا من الحاسوب أن يقلد كائناً بشرياً تقليداً محكماً لا يتميز به عنه في كل السبل ذات الصلة الوثيقة بالإنسان، هو في الحقيقة طلب زائد عن اللزوم . وكل ما أطلبه أنا شخصياً هو أن تشعر المحققة حقاً بالقناعة أن طبيعة الأجوبة التي تتلقاها من الحاسوب تدل

على أن هناك وجوداً للشعور يكمن خلف هذه الأجوبة ـــ حتى وإن كان شعوراً غريباً من نوعه . وهذا ، من الواضح ، شيء لا وجود له في نماذج الحواسيب التي صنعت حتى هذا التاريخ . ومهما يكن من أمر فإني أقدر أنه قد يكون هناك خطر من أن المحققة حتى وإن كانت قادرة على تقرير أي الممتحنين هو الحاسوب فإنها قد تمتنع، وربما لا شعورياً ، عن إضفاء صفة الشعور عليه حتى ***حين تستطيع*** إدراك وجوده. أو قد يكون لديها ، من جهة أخرى ، انطباع بأنها تحس بوجود مثل هذا الحضور الغريب ـ وأن تكون على استعداد لإضفاء نعمة الشك على الحاسوب ـ حتى حين لا يكون لهذا الحضور وجود أبداً . ولهذه الأسباب كان أول اختبار وضعه تورنغ ، يمتاز عن غيره بميزة مهمة وهي موضوعيته الكبيرة ، لذلك لن أتعرض فيما يلي إلى سواه بوجه عام . وأما مايستتبع ذلك من عدم الإنصاف للحاسوب الذي أشرت إليه في البدء (وأعني به ذاك الذي يستطيع أن يقوم بكل ما يستطيع أن يقوم به الإنسان لكي ينجح ، بينما لا يحتاج الإنسان إلى القيام بكل ما يستطيع الحاسوب أن يفعله)، فليس بالشيء الذي يبدو مهما عند من يؤيدون اختبار تورنغ ويرون فيه اختباراً صحيحاً للتفكير وما إلى سواه ، وفي جميع الأحوال تميل وجهة نظر هؤلاء غالبا إلى أنه لن يمضي وقت طويل حتى يصبح الحاسوب ***قادرا فعلاً*** على النجاح في الاختبار ـــ ولنقل قبل عام 2010 (وكان تورنغ قد اقترح في البدء أنه إذا كانت نسبة نجاح الحاسوب 30 بالمئة وكانت المحققة " معتدلة " في أحكامها وأعطيت خمس دقائق تحقيق فقط ، فإن من الممكن انجاز هذا الحاسوب قبل عام 2000). فهم بالتالي واثقون إلى حد ما بأن عدم الإنصاف المذكور هذا لن يؤخر هذا اليوم كثيراً!

ومهما يكن من أمر فإن هذه المسائل كلها مرتبطة بسؤال أساسي واحد وهو : هل تعطينا وجهة النظر العملية السابقة مجموعة معايير معقولة نستطيع أن نحكم بها على وجود، أو عدم وجود ، الصفات العقلية في شيء ما؟ هناك من يجادل بعنف بأن وجهة النظر هذه لا تستطيع ذلك ، وأن المحاكاة ، مهما بلغت من المهارة ، فإنها لن تكون مثل الشيء الحقيقي نفسه . أما موقفي أنا من هذه المسألة فهو موقف وسط إلى حد ما . فأنا ميال إلى الاعتقاد بأن المحاكاة ، مهما تكن متقنة، فلا بد أنها ستكتشف دائماً باختبارات سابرة ماهرة بما فيه الكفاية ، وهذا مبدئي العام، لأن المسألة مسألة إيمان (أو تفاؤل علمي) أكثر منها مسألة حقيقة مثبتة . فأنا إذن ، بمجمل الأحوال ، على استعداد لقبول اختبار تورنغ بصفته اختبارا مشروعا إلى حد ما في سياقه المخصص له. وهذا يعني قولنا ***أنه لو كان*** الحاسوب قادرا فعلا على الإجابة عن جميع الأسئلة المعروضة عليه بطريقة لا تختلف عن الطريقة التي يمكن للكائن البشري أن يجيب بها ـ

فيخدع المحققة الفطنة كما ينبغي* ومن دون أخطاء ــ لكان الحاسوب عندئـذ ***في تقديـري، وفي حال غياب كل دليل معاكس،*** يفكر فعلا ويحس ، ومـا إلى ذلـك. و مـا أرمـي إليـه هنـا مـن استخدام كلمات من قبيل " دليل " و " فعلا " و " تقدير " هو أني حـين أشـير إلى التفكـير أو الإحسـاس أو الفهـم أو ***الشعور*** بوجـه خـاص، فـإني أسـتعين بالمفـاهيم لأعـني بهـا " أشـياء " موضوعية يكون وجودها في الجسم الفيزيائي (المادي) أو عدمه شيئاً نحاول تأكيده ، لا مجرد تعبير لغوي مناسب ! وإني لأرى أن هذه النقطة حاسمة . ولكن ليس لدينـا لكـي نحـاول إبـراز وجود هذه الصفات ، إلا أن نقدم تقديرات تقوم على كل ما تيسـر لنـا مـن الأدلـة (وهـذا لا يختلف مبدئياً عن فلكي، مثلاً، يحاول التأكد من كتلة نجم بعيد جداً).

وهنا قد نتساءل : ترى ما نوع الدليل المعاكس الذي يمكن أن نأخذ بـه ؟ الحقيقـة أنـه مـن الصعـب وضـع قواعـد مسـبقة بهـذا الشـأن. ولكـني أود أن أوضـح أن الحقيقـة الـتي تقـول إن الحاسوب يمكن أن يصنع من ترنزيستورات وأسلاك وما إلى ذلك بدلا من العصبونات والأوعية الدموية وغيرها، ***ليست بحد*** ذاتها ، هي نوع الشيء الذي سأتخذه دليلا معاكساً . لأن الشـيء الذي في ذهني ليس هـذا و إنمـا هـو نظريـة ناجحـة في الشـعور يمكـن تطويرهـا في زمـن مـا في المستقبل، وتكون لها مضامين تتعلق بشعور الحاسوب المفترض. وأعني بقولي نظرية ناجحة، هـو أنها نظرية فيزيائية متماسكة ومناسبة ، وتتسق اتساقاً بديعاً مع بقيـة معارفنـا الفيزيائيـة، وعلـى نحو تتفق فيه توقعاتها بدقة مع تصريحات الكائنات الآدمية بشأن متى بدا أنهم واعون، وهل هم واعون، وإلى أي درجة، ولا شك أنه يترتب على هذه النظرية نتائج تتعلق بالفكرة التي نكونهـا عن شعور الحاسوب، حتى أن المرء يمكن أن يتصور "كاشفا للشعور" مصمما وفق مبادىء هذه النظرية ، وموثوقا بكل معنى الكلمة في حالة امتحان إنسان، ولكنه يعطـي في حالـة الحاسـوب نتائج تختلف عن نتائج اختبار تورنغ . لذلك يجب أن يكون المرء متروياً جداً في هـذه الظـروف عند تفسيره لنتائج اختبارات تورنغ . إذ يبـدو لي أن نظـرة المـرء إلى اختبـار تورنـغ مـن حيـث ملاءمته (أوجودته) تتوقف إلى حد ما على الطريقة التي يتوقع بهـا هـذا المـرء كيـف سـيكون تطور العلم والتكنولوجية . وسنعود فيما بعد إلى بعض هذه الأمور لحاجتنا إليها.

---

* أما أنا ، فإني سأظل متروياً بشأن تعريف ما يجب أن أعده نجاحاً أصيلاً في اختبار تورنـغ ، لأنـي أسـتطيع أن أتخيـل مثلاً أنه بعد إخفاق الاختبار مرات ومرات ، يستطيع الحاسوب أن يجمع الأجوبة كلها التي سـبق لـلرجل الممتحـن أن أعطاها ، ويعيدها بعد أن يضيف إليها بعض التفاصيل التي يختارها اعتباطياً . وبعد فترة ، يمكـن للمحققـة المنهكـة أن يخدعها الحاسوب وتجد نفسها بحاجة إلى أسئلة أصيلة ، وعندئذ أرى أن ذلك "خداع " من طرف الحاسوب.

الذكاء الاصطناعي

لقد أصبح الذكاء الاصطناعي (الذي يعبر عنه غالبا باختصار[+] " AI ") مجال اهتمام كبير في السنوات الأخيرة ، وهو يهدف إلى الاستعانة بوسائل آلية ، وغالبا إلكترونية ، للإقتداء قدر المستطاع بنشاط الإنسان العقلي ، وربما تحسين قدراته في النهاية في هذا المجال. وقد أتى هذا الاهتمام المتزايد بنتائج الذكاء الاصطناعي من أربعة اتجاهات على الأقل . فهناك بوجه خاص دراسة ***الروبوتيات*** (robotics)[x] التي تُعنى إلى حد بعيد بالأمور العملية التي تتطلبها صناعة الأدوات الآلية التي تنجز مهمات " ذكية " بسرعة وثقة تفوق قدرات الإنسان ، بل وفي ظروف معادية يمكن أن تتعرض فيها حياة الإنسان للخطر ـ مع أنها مهمات متعددة الجوانب وذات تعقيد كان يتطلب في السابق مداخلة الإنسان ومراقبته. كما أن **تطوير الأنظمة الخبيرة** التي ترمي إلى ترميز المعارف الأساسية لمهنة بكاملها ـ كالطب والقانون وغيرهما ـــ ووضعها "رزما " في حاسوب ، هو نشاط له أهميته من الناحية التجارية، وبالقدر نفسه من الوجهة العامة. ولكن هل من الممكن أن تحل هذه الرزم محل تجربة أفراد هذه المهنة وخبراتهم من الآدميين ؟ أم هل القضية كلها أن هذه القوائم الطويلة من المعلومات الواقعية ، إضافة إلى المراجع الشاملة المتصالبة، هي كل مل يمكن توقع إنجازه؟ إن مقدرة الحاسوب على إبداء ذكاء أصيل (أو تقليده) هي مسألة لها إذن نتائج اجتماعية كبيرة . وهناك مجال آخر يمكن أن يكون للذكاء الاصطناعي صلة به هو علم النفس. إذ إننا نأمل أن يتوصل الإنسان من محاولة تقليد عقله (أو عقل حيوان آخر) مستعينا بآلة إلكترونية ـ أو من إخفاقه في عمل ذلك ـــ إلى تعلم شيء له بعض الأهمية عن طريقة عمل الدماغ. وهناك أخيراً أمل متفائل في أن يكون لدى الذكاء الاصطناعي ، ولأسباب مماثلة لما سبق، شيء ينبئنا به عن مشاكل فلسفية عميقة، وذلك بأن يلقي لنا بعض الأضواء على معنى مفهوم ***العقل***.

ترى إلى أي مدى أمكن تطوير الذكاء الاصطناعي حتى الآن ؟ قد يكون من الصعب عليَّ أن أحاول تلخيص ذلك ، إذ إن هناك جماعات نشيطة عديدة في أنحاء مختلفة من العالم ، وأنا لم أطلع إلا على تفاصيل جزء صغير فحسب من هذا العمل . على أنه قد يكون من العدل القول أنه على الرغم من تحقيق أمور عديدة ذكية فعلا، فإننا ما زلنا بعيدين كل البعد عن محاكاة شيء يمكن تشبيهه بالذكاء الأصيل . ولكي أنقل لكم شيئاً من روح هذا الموضوع، سأذكر لكم في البدء شيئاً من الإنجازات الأولى (التي لا تزال رائعة فعلاً) ثم بعض الخطوات المهمة الحديثة في مجال الحواسيب الشطرنجية.

[+] من الإنجليزية. Artificial Intelligence

[x] أي الآلات الذاتية الحركة والتوجيه

كانت سلحفاة غريه والتر W. Grey Walter واحدة من آلات الذكاء الاصطناعي الأولى ، وقد صنعت في بداية الخمسينيات (3). وكانت تظل تتجول علـى أرض الغرفة إلى أن تضعف بطارياتها، وعندئذ تتجه إلى أقرب مأخذ للطاقة وتصل نفسها به ، فتعيد شحن بطارياتها ، ثم ما إن تمتلىء حتى تفصل نفسها عن المأخذ وتعود إلى مغامراتها عبر الغرفة ! ومنـذ ذلك الحين صنعت أشياء عديدة مماثلة (انظر مثلاً Waltz 1982) ثم هناك خط تطور آخر منفصل عن السابق إلى حد ما يتمثل في برنامج حاسوب فينوغراد , Teirry Winograd. وقد صمم هذا البرنامج في عام 1972 وهو قادر على التصرف تصرفا معقولا بمجموعة من المجسمات ذات الأشكال المختلفة والألوان المتنوعة ، ويمكنه عن طريق المحاكاة أن يضعها واحدة فوق الأخرى بمختلف التراتيب والنظم. ولكن ما يلفت النظر ، على الرغم من خطوات النجاح هذه ، هو كم كان شاقاً على فينوغراد أن يصمم " ذراع روبوت" موصولة حتى ولو كانت بسيطة يقتصر عملها على التلويح وتجنب الحواجز المزدحمة. هذا في الوقت الذي يمكن أن تبدو فيه هذه الحركات المطلوبة سهلة للإنسان البصير. أما تفسير المشاهد المرئية بوجه عام فهو أيضا مجال لم يصل منتجو الذكاء الاصطناعي فيه حتى الآن إلى أي شيء يقرب مما يبدو أن عقل الإنسان (أو حتى عقل معظم الحيوانات) قادر في الظاهر على إنجازه من غير جهد.

ولعل برنامج حاسوب كولبي K.M.Colby أقرب من سابقيه إلى الهدف المباشر من اختبار تورنغ. فقد طوره في أواسط الستينات . وهو يحاكي الطبيب النفساني ــ و بنجاح كبير . حتى أن بعض المرضى يفضلون الحاسوب على الطبيب البشري ، وهم مستعدون لكشف أنفسهم له أكثر مما يكشفونها لإنسان مثلهم . وإليكم على سبيل المثال (4) حواراً كهذا بين الحاسوب " المعالج " وأحد المرضى . دعونا ننظر في الحادثة التالية (التي أجريت بواسطة آلة كاتبة عن بعد teletype).

المعالج : كيف أستطيع مساعدتك ؟

المريض : لا أعرف

المعالج : حاول أن تفيدني بشيء عن ذلك

المريض : لا

المعالج : هل تستطيع الحديث بتفصيل ؟

المريض : إني مريض ومتعب في هذا اليوم.

المعالج : ألديك أي فكرة لماذا ؟

المريض : نعم إني مسن.

المعالج : أرجو أن تتابع.

المريض : يبدو أني فقدت الاهتمام بكل شيء.

المعالج : أخبرني بالمزيد عن هذه المشاعر.

المريض : بل عندي فكرة لماذا أشعر هكذا أيضاً.
المعالج : أعندك فكرة ؟
المريض : يبدو أني أفتقد وجود عائلة تخصني.
المعالج : مالذي يجعلك تشعر بأنك تفتقد وجود عائلة تخصك ؟
المريض : هذا يستفزني ؟
المعالج : ولماذا تعطي أهمية لذلك ؟

قد يعطي هذا الحوار انطباعاً خفياً بأن لدى الحاسوب نوعا من الفهم . ومع ذلك ، ليس لديه في الواقع شيء من هذا، كل ما في الأمر أنه يسير وفق بعض القواعد الميكانيكية البسيطة بكل معنى الكلمة (وثمة ترتيب معاكس للسابق، يحاكي فيه الحاسوب شخصا مريضاً بانفصام الشخصية (شيزوفرينية) فيبدي كل ما ورد في قاموسها من أعراض و ردود ، ويستطيع أن يضلل بعض طلاب الطب فيصدقون أن هناك مريضاً فعلاً يزودهم بهذه الإجابات !) .

إن خير أمثلة عما يمكن أن يظن أنه " سلوك ذكي " هو على الأرجح ذلك الذي تقدمه لنا الحواسيب التي تلعب الشطرنج ، حتى لقد بلغ بعضها الآن في الحقيقة (في عام 1989) مستوياً رفيعا جداً من الأداء بالمقارنة مع اللاعبين من الناس ، حتى ليقرب من كبار اللاعبين الدوليين (بلغت درجات هذه الحواسيب أقل من 2300 في سلم علامات (ELO) . في حين أن درجات بطل العالم كاسباروف بلغت أكثر من 2700) . ونخص بالذكر برنامج الحاسوب الذي أنجزه Dan and Kathe Spracklen (لصالح شركة Fidelity Excel التجارية لصنع المعالجات الصغرية) فقد بلغت درجاته 2110 في سلم (ELO) ومنحه اتحاد الولايات المتحدة للشطرنج USCF الآن لقب " أستاذ ". وهناك أيضاً برنامج مذهل أكثر من هذا ، ويسمى Deep Thought (أي التفكير العميق). ساهم في إنجازه مساهمة كبيرة زيونغ زوHsiung Hsu من جامعة كارنجي ملون Carnegie Mellon ، فقد بلغت درجته قريباً من 2500 في سلم ELO وحقق أخيراً إنجازاً باهرا بمشاركته في الجائزة الأولى (مع البطل الكبير طوني ميلز Tony Miles) في دورة الشطرنج (في لونغ بيتش ، في كالفورنية ، تشرين الثاني / نوفمبر 1988). وقد قهر حالياً بطلاً كبيراً (هو بينت لارسن Bent Larsen) للمرة الأولى (5) وتتفوق حواسيب الشطرنج اليوم في حل مسائل الشطرنج ، وتبز اللاعبين من الناس بسهولة في هذا المجال (6).

إن الآلات اللاعبة للشطرنج تعتمد كثيراً على المعرفة المخزنة في مرجع إضافة إلى قدرتها الحسابية الدقيقة . والجدير بالذكر أن هذه الآلات "أحسن " إجمالا بكثير من إنسان لاعب قرين لها حين يكون تنفيذ الحركات بسرعة كبيرة جداً هو المطلوب ، أما حين تتاح فرصة زمنية جيدة لكل حركة ، فاللاعبون من الناس يبزون الحاسوب نسبياً . ويمكن أن نفهم ذلك حين نعرف أن قرارات الحاسوب تتخذ على أساس حسابات واسعة سريعة ودقيقة . في حين أن

ميزة الإنسان اللاعب تتجلى في " أحكامـه " الـتي تعـول (بعكـس الحاسـوب) علـى تخميناتـه الواعية البطيئة . إذ تخفض هذه الأحكام عدد الإمكانيـات الجديـة الـتي يجـب مراعاتهـا في كـل مرحلة من الحساب تخفيضاً شديداً . وحين يكون الوقت متيسراً ، يصبح بالإمكان الوصـول في التحليل إلى عمق أكبر مما في الآلة التي تحسب فحسب وتحذف الإمكانيات مباشرة مـن دون أن تستخدم مثل هذه الأحكام . (ويتضح هذا الفرق أكثر من ذلك في اللعبة الشرقية الصعبة التي تسمى (غو) go، ففيها يصبح عدد الإمكانيات المتاحة في النقلة الواحدة أكـبر بكثـير ممـا في الشطرنج) . فهذه العلاقة بين الشعور وبناء الأحكام ، ستصبح فيمـا بعـد إحـدى حججـي المركزية الأساسية ، وبخاصة في الفصل العاشر .

الذكاء الاصطناعي يحاول فهم " السرور " و " الألم "

من الادعاءات التي يدعيها الذكاء الاصطناعي أنه يفتح لنا الطريق إلى نوع من فهم الحالات النفسية، كالسعادة، والألم ، والجوع ، ومثالنا على ذلك سـلحفاة غريـه والـتر Grey Walter، فحين تضعف بطارياتها تتغير طريقة سلوكها ، وتتصرف بطريقة صممـت لأن تملأخزانهـا مـن الطاقة . وهنا يبدو التماثل واضحا بين هذا السلوك والطريقة التي يمكن أن يتصرف بها الإنسان ـ أو أي حيوان آخر ـ حين يشعر بالجوع ، وقد لا يكون قولنا عن سلحفاة غريه إنهـا كـانت "جائعة " حين تصرفت بهذه الطريقة ، تحريفا كبيرا في اللغة . فقد كان في داخلها آلية حساسة لحالة الشحنة في بطاريتها تجعلها تغير نموذج سلوكها عندما تنخفض هـذه الشـحنة دون درجـة معينة . وهناك بلا شك شيء مشابه لهذا يجري في الحيوانـات عندما تجـوع ، مـا عـدا تغـيرات نماذج السلوك ، فهي أكثر تعقيداً و رهافة. فبدلاً من مجرد تحويـل نمـووذج سـلوكها إلى نمـوذج آخر ، تصبح لديها ***ميول*** لأن تتصرف بطرق أخرى . وتشتد هذه التغـيرات حتـى تبلـغ نقطـة معينة بحسب ازدياد الحاجة إلى إعادة التزود بالطاقة.

ويرى مؤيدو الذكاء الاصطناعي أنه من الممكـن نمذجـة مفـاهيم كـالألم والسـعادة بطريقـة مناسبة مماثلة لهذه السابقة. أو لكي لا نعقد الأمور ، دعونـا نعتمـد تدريجـاً واحـداً فحـــسب لقياس "المشاعر" يراوح ما بين أقصى "الألم" (الدرجة100-) وأقصى السرور (الدرجة 100+). ولنتصور أن لدينا أداة ـ هي آلة من نوع ما، وعلى الأغلب إلكترونيـة ـ لهـا وسـائل لتسـجيل درجـة " السـرور / الألم " (الإفتراضيــــة) الخاصـة بهـا الـتي سأشـير إليهـا باسـم درجـة ألمها / سرورها (أو باختصار درجة أ.س) على أن يكون لها بعـض أسـاليب السـلوك ، وأن تتلقى بعض المعطيات التي منها ما هو داخلي (كحالة بطارياتها) ومنهـا مـا هـو خـارجي . و الفكرة كلها هي أن تكون أفعالها مهيأة لكي ترفع درجة أ.س إلى حدها الأعلى . ومن الممكـن أن توجد عوامل متعددة تؤثر في درجة أ.س، منهـا حتمـاً أن نجعـل حالـة بطارياتهـا أحـد هـذه العوامل، فتسجل الشحنة المنخفضة درجة سالبة ، والشحنة المرتفعة درجة موجبة . كمـا يمكـن

أن توجد عوامل أخرى أيضاً . فمن الجائز أن تحمل أداتنا بعض الخلايـا الشمسـية الـتي تعطيهـا وسيلة بديلة للحصول علـى الطاقـة . وعندئـذ لا حاجـة لاستعمال البطاريات في حـال عمـل الخلايا .. كما يمكن تجهيزها أيضاً بما يمكنها من زيادة درجة ألمها ـــ سرورها قليـلاً بتحركهـا نحو الضوء ، وبحيـث تسـعى ، في حـال غيـاب العوامـل الأخـرى ، إلى فعـل ذلـك. (ولكـن سلحفاة غريه كانت في الحقيقة **تتجنب** الضوء !). فلا بد لها إذن من وسائل للقيـام بحسـابات تكشف بها عن الآثار التي يحتمل أن تخلفها أخيراً مختلف النشـاطات الصـادرة عنهـا في درجـة أ.س. كما يمكن أيضاً إدخال ترجيحات احتمالية تزيد أو تنقص الأثر على درجة أ.س وذلـك تبعاً لصدق البيانات التي بني عليها حساب هذا الأثر.

وقد يكون من الضروري أيضاً تزويد آلتنا بأهداف أخرى غير التزود بالطاقـة فحسـب ، و إلا لما كان لدينا وسيلة نميز بها بين "الألم" و"الجوع". ولكن لا شك بـأن المطالبـة بـأن يكـون لآلتنا وسيلة للإنجاب هو مطلب شطط، فالجنس مستبعد الآن . ولكن قد نزرع فيها " الرغبة " في مرافقة أمثالها من الآلات الأخرى ، بأن نجعل لقاءها بها يقترن بظهور درجـة أ.س موجبـة . أو بإمكاننا أن نجعلها " تلتمس " التعلم لصالحها الخاص ، بحيث يمكن أن يسـجل عندهـا مجـرد تخزين وقائع العالم الخارجي درجة موجبة من الألم والسرور. (أو بمزيد من الأنانية ، يمكننا أن نتدبر الأمر لكي يقترن ***قيامها لنا*** بالخدمات المختلفة ، بدرجة موجبة، وهذا بالتحديد ما يجـب عمله إذا أردنا صنع روبوت لخدمتنا). وهنا قد يحتج بعضهم أن فرض مثل هذه الأهداف علـى آلتنا ، وفقا لأهوائنا ، فيه شيء مصطنع .ولكن فرض ذلك لا يختلف كثـيرا عـن الطريقـة الـتي فرض فيها علينا الاصطفاء الطبيعي ، كأفراد ، أهدافا معينة محكومـة إلى حـد بعيـد بالحاجـة إلى نشر مورثاتنا.

لنفرض الآن أن آلتنا قد صنعت بنجاح وفقا لكل هذه الرغبات . فبأي حق يمكن أن نؤكد أنها تشعر فعلاً بالسرور حين تكون درجـة أ.س موجبـة ، وبـالألم حـين تكـون هـذه الدرجـة سالبة ؟ إن وجهة نظر الذكاء الاصطناعي (أو وجهة النظر العمليـة) هـي أننـا سـنحكم علـى ذلك من مجرد الطريقة التي تتصرف بها الآلة ، ذلك لأنها تعمل بطريقة تزيـد فيهـا درجتهـا إلى درجة موجبة كبيرة القيمة قدر الإمكـان (ولأطول فترة ممكنة). في حين أنها تتجنـب بالمقـابل الدرجات السالبة . وسنتمكن عندئذ ، بصورة معقولة ، ***من تعريف*** احساسها بالسرور على أنه مدى إيجابية الدرجة أ.س ــ وبالمقابل ***نعرف*** إحساسـها بـالألم علـى أنـه مـدى سـالبية الدرجـة أ.س. وسيدافعون عن ذلك بأن "معقولية" هذا التعريف تأتي من أن هذه هي بالتحديد الطريقـة التي تبدو فيها ردود فعل الإنسان وفقا لمشاعر السـرور والألم عنـده . لا شـك أن الأمـور عنـد الإنسان ليست (تقريباً) بهذه البساطة في واقع الأمر . فكمـا نعرف جميعاً نحن نحـاول كمـا يبدو ، في بعض الأحيان، اكتساب الألم عن عمـد أو نشـذ عـن طريقتنـا لكـي نتجنـب بعـض المسرات . وإنه لأمـر واضـح في الحقيقـة أن تصرفاتنـا توجههـا معايـير أعقـد مـن هـذه بكثـير.

(أنظر Dennett 1978 ص.ص 190-229) بيد أن الطريقة التي نتصرف بها فعلا، هي بتقريب متساهل جداً ، تجنب الألم والبحث عن المسرة . وهذا ما قد يكون كافياً لإعطاء الرجل العملي مبرراً، عند هذا المستوى التقريبي المتساهل، ***لأن يطابق*** الحد الذي بلغه مؤشر أ.س في الآلة مع درجة ألمها / سرورها . كما يبدو أن هذا النوع من المطابقة هو أيضاً من بين أهداف نظرية الذكاء الاصطناعي.

وهنا يجب أن نتساءل : هل المسألة حقاً أن آلتنا ***تشعر بالألم فعلاً*** عندما تكون درجة أ.س. سالبة ، وتشعر بالسرور حين تكون موجبة ؟ وهل يمكن لآلتنا أن تعاني أي شعور كان ؟ لاشك أن الرجل العملي سيقول " نعم هذا واضح " . أو أنه سيرفض هذه الأسئلة لكونها عنده بلا معنى . ولكن يبدو لي بجلاء أننا أمام سؤال جدي صعب يجب الوقوف عنده هنا . فالتأثيرات التي تسيرنا نحن أنفسنا هي تأثيرات من أنواع مختلفة ، ولا نشعر إلا ببعضها، كالألم والسرور . ولكن ثمة تأثيرات أخرى لا نعيها نحن مباشرة ، ويوضحها بجلاء مثال الشخص الذي يلمس موقداً حاراً . إذ تحدث الحرارة عنده فعلاً لا إرادياً يجعله يسحب يده حتى قبل أن يعاني أي إحساس بالألم . وهكذا يبدو أن هذه الأفعال اللا إرادية هي ، في واقع الأمر ، أقرب بكثير لاستجابات آلتنا للدرجة أ.س. مما هي عليه بالنسبة للآثار الفعلية للألم والسرور.

و كثيراً ما نستعمل تعابير ذات صيغة إنسانية في طريقة وصفنا لسلوك آلاتنا بقصد المزاح غالباً، فنقول" يبدو أن سيارتي لم تشأ أن تدور في هذا الصباح " أو " لا تزال ساعتي تظن أنها تعمل وفق توقيت كالفورنية" أو " يدعي حاسوبي أنه لا يفهم هذه التعليمات الأخيرة ، وأنه لا يعرف مالذي سيفعله بعدئذ " . طبعا نحن لا نعني حقاً ***التلميح*** إلى أن سيارتي يمكن أن ***تريد*** شيئا في الواقع ، أو أن ساعتنا ***تظن***، أو أن الحاسوب ***يدعي*** فعلاً أي شيء، أو أنه ***يفهم***، أو حتى ***يعرف*** ما الذي يفعله . إلا أن هذه الإفادات يمكن أن تكون معبرة بطبيعتها ومساعدة على فهمنا، بشرط أن نتقبلها فقط بالروح التي قصدت منها، و أن لا ننظر إليها بحرفية نصوصها. وسأتخذ موقفا شبيها بهذا إلى حد ما حيال مختلف ادعاءات الذكاء الاصطناعي القائلة بأنه يمكن للصفات العقلية أن تكون موجودة في الآلات التي صنعت ــ ***بصرف النظر*** عن الروح التي استهدفت منها! وإذا وافقت على القول : إن سلحفاة غريبة والتي يمكن أن تكون جائعة، فذلك أني عنيت هذا المعنى نصف الهازل . وإذا كنت مستعداً لاستخدام كلمات مثل " ألم " أو" سرور ". في عبارة درجة أ.س. آلة ما، كما ذكر أعلاه ، فذلك لأني أجد هذه الكلمات تساعد على فهمي لسلوكها بسبب أوجه شبهها مع سلوكي الخاص وحالتي العقلية . ولكني لا أقصد بذلك أن أوجه الشبه هذه هي حقا قريبة جداً، أو أنه لا يوجد في الحقيقة أمور أخرى لا شعورية تؤثر في سلوكي بطريقة أكثر شبها بذلك بكثير.

---

* وذلك حتى عام 1989 على الأقل.

وهكذا آمل أن يكون واضحاً للقارىء أن فهم الصفات العقلية يتطلب في رأيي أموراً أكثر بكثير مما نحصل عليه مباشرة من الذكاء الاصطناعي . ومع ذلك ، أعتقد أن الذكاء الاصطناعي يقدم لنا نموذجاً يجب الاهتمام به وأخذه في الحسبان . وأنا لا أقصد بقولي هذا التلميح إلى أن ما أنجز في مجال المحاكاة مع الذكاء الحقيقي هو كثير جداً ، هذا إن كان ثمة شيء من ذلك . ولكن يجب ألا ننسى أن الموضوع لا يزال في مهده، و أن الحواسيب ستصبح أسرع وستكون لديها ذاكرات تخزين سريعة أوسع ، وعدد أكبر من الوحدات المنطقية . وسيكون لديها أعداد ضخمة من العمليات التي تنجز على التوازي ، فضلا عن تحسينات في التصميم المنطقي وفي فن البرمجة. وستلاقي هذه الآلات، التي هي مركبات فلسفة الذكاء الاصطناعي ، تحسينات واسعة جدا في قدراتها التقنية . أضف إلى ذلك أن هذه الفلسفة نفسها ليست منافية للعقل بطبيعتها . فلربما أمكن فيما بعد محاكاة ذكاء الإنسان فعلا بدقة شديدة بحواسيب إلكترونية . وستكون هذه الحواسيب هي أساساً حواسيب اليوم نفسها مبنية على مبادىء مفهومة حالياً ، ولكن صفاتها ، كالقدرة والسرعة وغيرها ، ستكون أكبر بكثير ، وهي صفات يؤمل بأن تتحلى بها الحواسيب في السنوات القادمة. وربما ستكون هذه الآلات ، بالفعل ، ذكية أيضا . وربما ستفكر وتشعر وتملك عقولاً. أو ربما لن تصبح كذلك وأن الأمر يحتاج إلى مبدأ جديد ، وهو حالياً ما نفتقده كلياً . تلك هي إذن المشكلة، وهي مسألة لا يمكن استبعادها بسهولة . وسأحاول أن أقدم الدليل كأحسن ما أراه ، وسأعرض عليكم أخيراً اقتراحاتي الخاصة.

الذكاء الاصطناعي القوي وغرفة سيرل (Searl) الصينية

ثمة وجهة نظر أخرى تعرف باسم الذكاء الاصطناعي القوي . وهي تتبنى ، بدلاً مما سبق، موقفاً متطرفاً حول هذه القضايا (7)، فبالنسبة لها ، ليست الآلات التي سبقت الإشارة إليها وحدها هي التي يجب أن يشار إليها بأنها ذكية وتملك عقلا وغير بذلك ، بل يمكن أن نعزو لكل أداة حاسوبية تعمل عملاً منطقياً، صفات عقلية، حتى البسيطة جداً منها ، الميكانيكية ، أو مثل جهاز تنظيم الحرارة Thermostat (8) والفكرة في ذلك هي أن النشاط العقلي ليس سوى القيام بسلسلة من العمليات المحددة بدقة ، يطلق عليها عادة اسم خوارزمية algorithm. وسأوضح فيما بعد بدقة أكبر ما المقصود بالخوارزمية فعلا. أما الآن فيكفينا أن نعرّف الخوارزمية تعريفاً بسيطاً بأنها إجراء حسابي من نوع ما . والخوارزمية في حالة جهاز تنظيم الحرارة بسيطة إلى أبعد حد ، إذ يتابع الجهاز باستمرار ارتفاع درجة حرارته عن حرارة المحيط أو انخفاضها عنها، وعندئذ يتخذ إجراءاته بصورة أن الدارة تنقطع في الحالة الأولى، وتتوصل في الحالة الثانية. ولكن الخوارزمية، في حالة أي نوع ذي شأن من أنواع النشاط العقليّ، للدماغ الإنساني، ستكون أعقد من ذلك بكثير، وإن كانت بالنسبة لوجهة نظر الذكاء الاصطناعي القوي خوارزمية ليس إلا. وهي تختلف في سويتها اختلافاً كبيراً جداً عن خوارزمية جهاز

تنظيم الحرارة البسيط، ولكن ليس من الضروري أن تختلف عنه بالمبدأ . فالفرق إذن ، وفقاً للذكاء الاصطناعي القوي ، بين طريقة عمل دماغ الإنسان الأساسية (بما في ذلك جميع تجلياته الواعية) وطريقة عمل جهاز تنظيم الحرارة ، تكمن فحسب في هذا التعقيد الأكبر بكثير في حالة الدماغ (أو في البنية "الأعلى مرتبة " أو في " المزايا الذاتية الاحتكام "، أو في ميزة أخرى يمكن أن ننعت بها الخورازمية). والأهم من ذلك ، أن جميع الصفات العقلية ـــ من تفكير، وإحساس ، وذكاء ، وفهم ، وشعور ــ هي في نظر أصحاب الذكاء الاصطناعي القوي ، مجرد مظاهر لهذا الأسلوب المعقد في العمل ، الأمر الذي يعني أنها بالنسبة لهم ليست سوى ميزات للخوارزمية التي ينفذها الدماغ.

وتقاس قوة أي خوارزمية من نوع خاص بإنجازها ، أي بدقة نتائجها و باتساع شموليتها واقتصادها والسرعة التي يمكن أن تعمل بها . ولا بد للخوارزمية التي تدعي أنها تجاري ما يفترض أنه يجري في دماغ الإنسان من أن تكون شيئا مذهلاً . ولكن لو كان للدماغ خوارزمية من هذا النوع ــ وهذا ما يدعي مؤيدو الذكاء الاصطناعي قطعاً أنه موجود ـــ لأمكن لهذه الخوارزمية عندئذ ــ من حيث المبدأ ــ أن تجري على حاسوب ما . بالفعل، لقد كان بالإمكان أن تجري على ***أي*** حاسوب إلكتروني عادي حديث ما لم تكن قدرة التخزين أو سرعة الإجراء محدودتين(قاصرتين) (وسيرد تبرير هذه الملاحظة حين نصل إلى دراسة آلة تورنغ العامة). ومن المتوقع سلفا التغلب في مستقبل ليس بالبعيد جداً على كل قصور من هذا النوع في الحواسيب الكبيرة السريعة. ففي إطار هذه الإمكانية يمكن لمثل هذه الخوارزمية، إذا وجدت، أن تجتاز امتحان تورنغ . و عندئذ قد يدعي مؤيدو الذكاء الاصطناعي القوي أنه متى ما بدأت الخوارزمية العمل، فإنها ستعاني بذاتها الأحاسيس وستملك الشعور وستصبح عقلاً.

وكل إنسان على الإطلاق ، سيوافق على أن هذه الحالات العقلية يمكن مطابقتها بهذه الطريقة مع الخوارزميات. ونخص بالذكر أن الفيلسوف الأميركي جون سيرل John Searle (1980، 1987)كان قد عارض وجهة النظر هذه معارضة قوية . وقد أورد أمثلة ***سبق*** أن نجح فيها حاسوب في بعض الأشكال المبسطة لاختبار تورنغ ، بعد أن كان قد بُرمج برمجة مناسبة . ولكنه أورد حججا قوية يدعم فيها وجهة النظر القائلة إن صفة " الفهم " العقلية المتعلقة بذلك، كانت على رغم ذلك ، غائبة كلياً . وكان أحد هذه الأمثلة مبنياً على برنامج حاسوب صممه روجر شانك (Abelson & Schank 1977) : وكانت الغاية من هذا البرنامج هي تقديم محاكاة لفهم قصة قصيرة مثل " دخل شخص إلى أحد المطاعم وطلب طبق " همبرغر " وعندما وصله ، وجده محروقا لدرجة الهشاشة ، فاندفع غاضبا وخرج من المطعم من دون أن يدفع الحساب أو يترك بقشيشا" . وكمثال ثان : "دخل شخص إلى أحد المطاعم وطلب طبق همبرغر وعندما وصله، كان مسروراً جداً منه. فأعطى النادلة عند مغادرته المطعم "بقشيشا" كبيراً قبل أن يدفع الحساب "، ولكي نختبر "فهم" الحاسوب للقصتين نسأله : هل أكل الشخص الهمبرغر

في كل من الحالتين (الأمر الذي لم يذكر بوضوح في كلا القصتين) . يمكن للحاسوب في هذا النوع من القصص البسيطة والأسئلة السهلة أن يعطي أجوبة لا تختلف اختلافاً جوهرياً عن أجوبة من يتكلم الإنجليزية ، لكونه سيعطي في هاتين الحالتين الخاصتين الإجابة " لا " في الحالة الأولى ، و " نعم " في الثانية . ومن هذه الوجهة المحدودة ***جداً***، نجحت إحدى الآلات في اختبار تورنغ.

والمشكلة التي يجب أن ننظر فيها الآن هي : هل يشير هذا النجاح حقاً إلى أي فهم أصيل من قبل الحاسوب ـ أو ربما من قبل البرنامج نفسه ؟ هنا لجأ سيرل إلى فكرته عن "الغرفة الصينية" لكي يثبت أنه ***لا يوجد*** فهم أصيل عند الحاسوب . فقد تصور سيرل، قبل كل شيء ، أن رواية القصتين تتم باللغة الصينية بدلا من الإنجليزية ـ وهذا حتما ليس تغييرا جوهرياً ـ وأن جميع عمليات خوارزمية الحاسوب الخاصة بهذا التمرين يجري تلقيهما باللغة الإنجليزية، وعلى شكل مجموعة من التعليمات تبين كيفية معالجة بعض البطاقات التي كتبت عليها رموز الكتابة الصينية. وقد تخيل سيرل نفسه أنه هو الذي يقوم بكل هذه المعالجات وهو في داخل غرفة مغلقة، وأن هناك من يزوده بسلاسل الرموز التي تحكي القصتين، وبالتالي الأسئلة المتعلقة بها من فتحة شق صغير إلى داخل الغرفة، فلا يسمح بعدئذ بدخول أي معلومات أخرى أيا كانت من الخارج . وحين تكتمل أخيراً جميع المعالجات، ترسل نتائجها أيضاً إلى الخارج من الشق الصغير . وهنا لا بد أن يتضح بأن هذه السلسلة النهائية الناتجة ستكون المقابل الصيني فحسب لكلمة " نعم " أو " لا " بحسب مقتضى الحال ، لأن جميع هذه المعالجات تنفذ بخوارزمية برنامج شانك ، وهكذا نحصل باللغة الصينية على الجواب الصحيح عن السؤال الأصلي المتعلق بقصة رويت باللغة الصينية. وهنا يؤكد لنا سيرل بكل وضوح أنه لا يفهم كلمة واحدة من اللغة الصينية . لذلك لن تتكون لديه أدنى فكرة عما تتحدث عنه القصتان ، وعلى رغم ذلك سيتمكن سيرل من العمل وكأنه رجل صيني قد فهم فعلا القصتين ، لأنه سيكون قد نفذ سلاسل العمليات المكونة لخوارزمية شانك تنفيذاً صحيحاً (بعد أن تلقى التعليمات الخاصة بهذه الخوارزمية بالإنجليزية) . وهنا تقوم وجهة نظر سيرل ـ وهي في نظري قوية بكل معنى الكلمة ـ على أن مجرد تنفيذ خوارزمية ناجح لا يعني بذاته أي فهم لمضمونها . لأن سيرل (المتخيل) المحجوز داخل غرفته الصينية المغلقة لا يمكن أن يكون قد فهم كلمة واحدة من أي من القصتين.

لقد واجه سيرل عدداً من الاعتراضات على حجته، لكنني لن أذكر سوى تلك التي أراها ذات قيمة جدية : وهي أولاً أنه ربما كان هناك شيء مضلل في عبارة " لا يمكن أن يكون قد فهم كلمة واحدة " كما أوردتها أعلاه. ذلك أن للفهم علاقة بالأشكال مثلما له علاقة بالكلمات المفردة. لذلك يمكن للمرء أن يدرك ، عند تنفيذ خوارزميات من هذا النوع، شيئاً ما من السياق العام الذي تكونه هذه الرموز من دون أن يفهم المعاني الفعلية للعديد

من الرموز الفردية .من ذلك مثلاً أن الرسم الصيني الدال على " همبرغر " (هذا إذا وجد مثل ذلك فعلاً) كان يمكن أن يستعاض عنه بالرسم الدال على طبق آخر وليكن " معكرونة ". وعندئذ لن تتأذى القصتان أذى ذا معنى. ومع ذلك يبدو لي أنه من المعقول أن نفترض أن القليل جداً في الواقع من معنى القصتين الفعلي (حتى لو رأينا أن هذه المبادلة بين الطبقين كأنها بلا أهمية) سيظهر فيما لو واصل المرء متابعته لما يتراءى له من بين تفاصيل هذه الخوارزمية.

و هي، ثانياً، أنه يجب أن يأخذ المرء في حسبانه أن تنفيذ برنامج حاسوب ما ، ولو كان بسيطا فعلا ، هو (غالباً) عمل طويل جداً وممل فيما لو نفذ باليد من دون آلة. (وهذا في النهاية هو السبب الذي لأجله نملك حواسيب تقوم لنا بمثل هذه الأعمال). ولو أخذ سيرل على عاتقه فعلاً إنجاز خوارزمية شانك بتلك الطريقة التي اقترحناها لكي يجيب عن سؤال واحد فحسب، لكان عليه أن ينهمك على الأرجح لعدة أيام أو شهور، أو حتى سنوات، في عمل ممل إلى أبعد الحدود ــ وهذا بالنسبة للفيلسوف نشاط غير معقول على الإطلاق ! على أن هذا الاعتراض لا يبدو لي وجيها ، لأننا معنيون هنا بأمور على *مستوى المبادىء* وليس بالأمور العملية. ولكن الصعوبة تزداد عند التعرض لبرنامج افتراضي يفترض فيه أن يكون على درجة كافية من التعقيد لكي يجابه دماغ الإنسان وينجح بالتالي في اختبار تورنغ نجاحاً حقيقياً. فعندئذ سيكون أي برنامج من هذا القبيل مرعباً في تعقيداته، لدرجة أنه يمكن لأحدنا أن يتصور أنه لكي ينجز الرد على أحد أسئلة اختبار تورنغ، حتى البسيطة منها ، يمكن أن ينهمك في العديد من الخطوات التي لن تكون هناك امكانية لأي إنسان أن ينجز وحده وبيده خوارزميتها طيلة سنوات عمر الإنسان العادي. أما أن الأمر سيكون معقداً فعلاً على هذا النحو الذي نتصوره ، فهذا ما يصعب تأكيده في حال غياب أي برنامج من هذا القبيل (9) . ولكن لا يمكن في رأيي أن نتجاهل ببساطة هذه المشكلة الفائقة التعقيد بأي حال من الأحوال. فنحن حقا معنيون هنا بأمور على مستوى المبادىء ، ولكن ليس أمرا يفوق التصور بالنسبة لي، أن يكون هناك قدر " حرج " من التعقيد ، يجب أن تبلغه الخوارزمية (التي علينا إنجازها) لكي تظهر صفات عقلية . بل ربما كان هذا القدر الحرج من الضخامة بحيث لا يمكن لأي إنسان أن ينفذ باليد ، و بالطريقة التي تصورها سيرل، خوارزمية لها مثل هذا التعقيد.

وقد رد سيرل بنفسه على هذا الاعتراض الأخير بأن جعل فريقاً كاملاً من الأشخاص، الذين يعرفون معالجة الرموز ولا يتكلمون اللغة الصينية ، يحلون محل الساكن الوحيد السابق (سيرل نفسه) في غرفته الصينية. ولكي يجعل سيرل عدد الأشخاص كبيراً بما فيه الكفاية، تصور أيضاً أنه استعاض عن غرفته الصينية بمساحة الهند كلها وشعب الهند بأكمله . المنهمك عندئذ بمعالجة الرموز (باستثناء أولئك الذين يفهمون اللغة الصينية). وهذا التصور، وإن كان مستحيلاً عملياً ، إلا أنه *من الناحية المبدئية* ليس مستحيلاً. أما حجته الآن فهي بصورة أساسية كما كانت، وهي أن معالجي الرموز *لن يفهموا* القصة ، على الرغم من ادعاء مناصري

الذكاء الاصطناعي القوي بأن صفة " الفهم" العقلية ستطرأ بمجرد تطبيق الخوارزميات المناسبة . ومع ذلك سيلوح لنا الآن اعتراض وجيه آخر : ترى أليس هؤلاء الهنود أشبه بالعصبونات الفردية في دماغ إنسان، منهم بدماغ هذا الإنسان نفسه؟ لا أحد سيقول إن العصبونات التي تقدح، والتي تكون في الظاهر النشاط الفيزيائي للدماغ عند قيامه بالتفكير، هي ***نفسها*** ، ***كل بمفرده*** ، تفهم ما الذي يفكر فيه الدماغ. فلماذا نتوقع إذن أن يفهم كل واحد من الهنود تلك القصة الصينية ؟ ويرد سيرل على هذا التشبيه مشيرا إلى الاستحالة الواضحة في أن تكون الهند، أي البلد نفسه، فاهمة لقصة ليس بين سكانها واحد يفهمها . ويدلل على ذلك بأن أي بلد كان هو مثل جهاز تنظيم الحرارة أو السيارة ، ليس " معنياً بالفهم " ، في حين أن شخصاً بمفرده معني به.

إن هذه الحجة أقل قوة بكثير من سابقتها . و أعتقد أن حجة سيرل[يعني الغرفة الصينية] تكون في أوج قوتها حين يكون هناك شخص واحد فحسب ينفذ الخوارزمية . فعندئذ نحصر انتباهنا في حالة خوارزمية غير معقدة جداً، وذلك لكي يستطيع شخص بمفرده أن ينفذها في مهلة أقل من حياة الإنسان. أما حجته القائلة إنه ليس هناك أي نوع من " الفهم " ناتج عن تنفيذ الشخص لتلك الخوارزمية، فهي حجة لا تنفي نفياً قاطعاً وجود نوع من " الفهم " مرافق للتنفيذ ، ولكن من دون أن يبلغ ساحة الوعي . ولكنني سأتفق معه على أن هذه الإمكانية على أقل تقدير، غير محتملة إلى حد ما . لذلك أعتقد أن في حجة سيرل قوة كبيرة كامنة فيها ، حتى و إن لم تكن حاسمة على الإطلاق . إنها بالأحرى مقنعة في برهانها على أنه لا يمكن لمجرد خوارزميات لها نوع التعقيد الموجود في برنامج شانك للحاسوب أن تملك أي فهم أصيل للمهمات التي تقوم بها . كما أنها ***توحي*** (لا أكثر) بأنه ما من خوارزمية، مهما كانت درجة تعقيدها، يمكن أن تشتمل وحدها وبنفسها إطلاقا على أي فهم أصيل . وهذا بخلاف ما يدعيه أنصار الذكاء الاصطناعي القوي.

وعلى قدر ما أرى، لا تزال لدينا مشاكل أخرى وجيهة جداً مع وجهة نظر الذكاء الاصطناعي القوي . فأنصار هذا الذكاء يرون أن ما يهم فقط هو الخوارزمية، و أنه لا فرق، سواء أنجز هذه الخوارزمية أحد الأدمغة أم حاسوب إلكتروني، أم سكان بلاد الهند بكاملها، أم آلة ميكانيكية من عجلات ومسننات ، أم منظومه من أنابيب الماء. بمعنى أن بنية الخوارزمية المنطقية هي الشيء المهم بالنسبة للحالة العقلية التي يفترض أن البنية تمثلها، وذلك لكون الوسائل الفيزيائية الخاصة التي تجسد الخوارزمية لا علاقة لها البتة بتلك الحالة . الأمر الذي يستتبع في الواقع نوعاً من ***" الثنوية "*** . وهذه الأخيرة هي وجهة نظر فلسفية انتشرت نتيجة التأثير الشديد الذي خلفه فيلسوف القرن السابع عشر ورياضيه رينيه ديكارت ، وهي تقول بوجود نوعين منفصلين من القوامات (جمع قوام) : قوام هو العقل (المفكر) وقوام هو المادة العادية ، أما هل يمكن أو لا يمكن أو كيف يمكن لأحد هذين القوامين أن يؤثر في الآخر ، فهذه

مسألة أخرى ـ والنقطة الجوهرية هي أن هذه النظرة لا تفترض أن القوام «عقل» مكون من مادة وإنما تفترض أنه يمكن أن يوجد العقل وحده بمعزل عن المادة . وهكذا يكون القوام «عقل» للذكاء الاصطناعي القوي هو بنية الخوارزمية المنطقية. أما ما هي الوسائل الفيزيائية الخاصة التي تجسد هذه الخوارزمية فهي شئ لا علاقة له إطلاقاً كما ذكرت منذ قليل . أو بمعنى آخر، إن للخوارزمية نوعاً من "الوجود" غير متجسد ، قائم بمعزل تام عن أي تحقيق له بوسائل فيزيائية. أما كيف يجب أن نأخذ هذا النوع من الوجود على محمل الجد ، فهذه مسألة أخرى سأضطر للعودة إليها في الفصل القادم . وسنرى أنها جانب من مسألة عامة هي مسألة واقعية الأشياء الرياضية المجردة ، الأفلاطونية . أما الآن فسأتجنب هذه القضية العامة، وسأكتفي بالإشارة إلى أن مناصري الذكاء الاصطناعي القوي يأخذون كما يبدو ، واقعية الخوارزميات على الأقل على محمل الجد ، لأنهم يعتقدون أن الخوارزميات هي قوام (أو جوهر) تفكيرهم وإحساساتهم وفهمهم وإدراكاتهم الواعية. فثمة إذن سخرية واضحة، كما يشير سيرل، من هذا الواقع الذي وصل إليه مؤيدو الذكاء الاصطناعي القوي ، إذ إن وجهة نظرهم تؤدي كما بدا لنا إلى نوع من الثنوية المتطرفة، وهذه بالتحديد هي وجهة النظر التي آخر ما يتمناه مؤيدو الذكاء الاصطناعي القوي هو أن تلصق بهم.

والطريف أننا نعثر على هذا البرهان ذي الحدين في وقائع الحجة التي قدمها أحد أقطاب مؤيدي الذكاء الاصطناعي القوي هوفستادر Douglas Hofstadter 1981 في حوار عنوانه "محادثة مع دماغ اينشتين ". ففيه يتصور هوفستادر كتابا يفوق الوصف في اتساقه ، ويفرض فيه أنه يحوي وصفا كاملا لدماغ ألبرت أينشتين، وأن أي سؤال قد يحرص أحدنا على توجيهه إلى أينشتين يمكن أن يجد جوابه فيه كما لو أن أينشتين الحي هو الذي أجابه، وذلك بمجرد تصفح الكتاب واتباع جميع التعليمات الواردة فيه بكل حرص. وعبارة "بمجرد" هنا، هي طبعا عبارة مغلوطة بحسب ما حرص هوفستادر أن يشير . فهو يدعي أن كتابه يكافيء مبدئيا مكافأة تامة (بالمعنى الإجرائي لا ختبار تورنغ)، نسخة مضحكة في إبطائها عن أينشتين الحقيقي . فهذا الكتاب ، تبعا للرأي الذي يدافع عنه أصحاب الذكاء الاصطناعي القوي ، يفكر ويفهم وله أحاسيس ومشاعر حتى كأنه هو أينشتين بالضبط، ولكنه يعيش بمعدل بطيء إلى درجة رهيبة (حتى أن العالم الخارجي سيبدو بالنسبة له ، أي لهذا الكتاب/ الأينشتين، كأنه مندفع بمعدل متسارع تسارعاً غير معقول). بالفعل، لما كان صاحب الكتاب يفترض في كتابه أنه مجرد تجسيد خاص للخوارزمية التي تكون ذات أينشتين، فلا بد في الواقع من أن يكون أينشتين.

غير أن هناك صعوبة جديدة تعرض الآن نفسها بنفسها فمن الجائز أن لا يفتح الكتاب أبداً، أو قد يظل موضع دراسة دائمة عند عدد لا يحصى من الطلاب والباحثين الساعين وراء الحقيقة، فكيف سيعرف الكتاب الفرق بين الحالين ؟ وقد لا تكون هناك حاجة لفتحه وإنما تستقى معلوماته بواسطة الأشعة السينية للتصوير الطبقي المحوري، أو بطرق تكنولوجية

سحرية. ترى ألن تظهر عليه علائم وعي أينشتين إلا حين يكون الكتاب تحت فحص كهذا ؟ وإذا قرر شخصان أن يسألاه السؤال نفسه في زمنين متباعدين فهل سيكون وعيه مضاعفاً ؟ أم سيتطلب ذلك منه لحظتين موقتتين ، مختلفتين ومنفصلتين، يكون فيهما في الحالة **نفسها** من وعي أينشتين ؟ أوربما لن يستثار الوعي عند الكتاب إلا حين يخضع **للتعديل** ؟ فنحن ، في النهاية ، حين نعي عادة شئيا ما نتلقى عنه إعلاما من العالم الخارجي الذي يحرك ذاكرتنا ، فتتعدل عندئذ في الحقيقة حالة عقولنا تعديلا ضعيفا. فإذا كان الأمر كذلك ، فهل يعني هذا أنها **التغيرات** (المناسبة) في الخوارزميات هي التي يجب أن نقرنها بالأحداث العقلية وليس **تنشيط** (أو تشغيل) الخوارزميات . إن التعديل (المناسب) في الخوارزميات (و أنا هنا أعتبر مخزن الذاكرة جزءا من الخوارزميات) هو الذي يجب أن يقترن بالأحداث العقلية وليس (أو ربما إضافة إلى) تنشيط هذه الخوارزميات ؟ أم سيظل الكتاب ـ الأينشتين واعيا لذاته وعياً تاماً حتى لو لم يتفحصه أحد أو يزعجه شخص أو أي شيء آخر ؟ لقد لامس هوفستادر بعضا من هذه الأسئلة ، ولكنه لم يحاول محاولة جدية الإجابة عنها أو الوصول إلى نتيجة بشأن معظمها.

ترى مالذي يعنيه تنشيط خوارزمية ما أو تجسيدها في صورة فيزيائية ؟ ألا يعني تغيير الخوارزمية ببساطة إلغاء واحدة واستبدال أخرى بها ؟ وهل لهذا كله في الواقع أدنى علاقة بعواطفنا و حالات الشعور لدينا ؟ قد يعجب القارئ (مالم يكن ، أو تكن ، من مناصري الذكاء الاصطناعـي القوي) لماذا خصصت مكانا كبيرا لهذه الفكرة الواضحة الاستحالة (فكرة الكتاب/ الأينشتين) ولكنني في الواقع *لا أرى* الفكرة مستحيلة استحالة أصيلة في ذاتها ــ بل إنها خاطئة ليس إلا ! لأن فيها بالفعل قوة في التفكير أعمق من الذكاء الاصطناعي القوي ، وهي التي يجب أن يحسب حسابها ، و هذه القوة هي التي سأحاول أن أوضحها . وفي رأيي أن فيها أيضا جاذبية في بعض الأفكار ــ فيما إذا عدلت التعديل المناسب ـــ سأحاول أيضاً أن أنقلها إليكم . وفي رأيي أيضا أن وجهة النظر الخاصة المعارضة التي عبر عنها سيرل، تحوي كذلك بعض المعضلات الجدية والاستحالات البادية . ولكني مع ذلك أوافقه و إن كان إلى مدى محدود.

يبدو من مناقشات سيرل أنه قد قبل ضمنا بأن نموذج الحواسيب الإلكترونية الحاضرة، يمكن أن يصبح في مستقبل ليس ببعيد، قادرا على النجاح فعلا في اختبار تورنغ ، ولكن بعد أن تطرأ عليه زيادة كبيرة في سرعة الأداء وحجم الذاكرة السريعة (وربما مع أداء على التوازي أيضاً)، كما أنه مستعد للتسليم بالرأي الذي يدافع عنه أصحاب الذكاء الاصطناعي القوي (ومعظم أصحاب وجهات النظر " العلمية " الأخرى) وهو أننا لسنا سوى " الأداء المتزامن" لعدد ما من البرامج الحاسوبية (التي تعمل في "آن واحد"). وهو يذعن أيضا للرأي القائل: " إن الدماغ طبعا ، هو حاسوب رقمي، إذ لما كان كل شيء حاسوبا رقميا ، فالدماغ هو كذلك(10)" ويصر سيرل على أن الفرق بين وظيفة دماغ الإنسان (الذي يمكنه أن يملك عقلا) ووظيفة

الحاسوب الإلكتروني (الذي لا يمكنه) يكمن كليا في مواد بناء كل منهما ، على الرغم من أن كلا منهما يمكن أن يكون منفذاً للخوارزمية نفسها. وهو يدعي، ولكن لاسباب غير قادر هو على شرحها ، بأنه يمكن أن يكون للأشياء البيولوجية (الأدمغة) " غايات "، كما يمكنها فهم دلالات الألفاظ التي يرى سيرل أنها هي التي تحدد ميزات النشاط العقلي. في حين أن الاشياء الإلكترونية لا يمكن أن يكون لها مثل ذلك . ولكن يبدو لي أن هذا التمييز لا يدلنا بذاته على أي طريق يؤدي إلى نظرية مفيدة للعقل ، إذ ماهو الشيء الخاص جداً الذي يميز المنظومات البيولوجية ، بصرف النظر عن الطريقة التاريخية التي تطورت بها (وعن حقيقة أنه حدث أن كنا نحن من هذه المنظومات) و الذي يجعلها تصنف بأنها وحدها الأشياء التي يمكن أن تصل إلى امتلاك الغايات وفهم مدلولات الألفاظ؟ ويلوح لي ادعاء سيرل بارتياب كأنه تقرير شيء منزل ، وأنه لا يقل في ذلك حتى عن تأكيدات أصحاب الذكاء الاصطناعي القوي الذين يصرون على أن مجرد تشغيل الخوارزمية يمكن أن يستحضر حالة الوعي الشاعر!

إنني أرى بأن سيرل، وكثيراً غيره من الأشخاص، ضللهم علماء الحاسوب. وهؤلاء بدورهم ضللهم الفيزيائيون (ولكن هذا ليس خطأ الفيزيائيين ، ***فهؤلاء أنفسهم*** لا يعرفون كل شيء). إذ يبدو أن هناك اعتقاداً شائعاً بأن كل شيء هو " حاسوب رقمي "، وما أرمي إليه في هذا الكتاب هو أن أحاول إثبات لماذا ، بل ربما كيف، أنه ليس من الضروري أن يكون الأمر كذلك.

العتاد و البرمجيات

يستخدم التعبير Hard Ware (العتاد) في لغة الحاسوب الدارجة للدلالة على التجهيزات الفعلية الموجودة فيه (كالدارات المطبوعة ، والترنزستورات ، والأسلاك ، ومكان التخزين المغنطيسي ...) بما في ذلك الوصف الكامل للطريقة التي يتصل بها شيء مع الآخر . بالمقابل، يشير التعبير Soft Ware (البرمجيات) إلى مختلف البرامج التي يمكن أن تعمل عليها الآلة. وكان أحد اكتشافات تورنغ الكبيرة أن أية آلة بلغ فيها العتاد درجة معينة من التعقيد والمرونة، تكون ***مكافئة*** لأية آلة أخرى مثلها . ويعني التكافؤ هنا أنه في حال أي آلتين **A** و**B** من هذا النوع، يوجد برنامج نوعي ، إذا أعطي للآلة **A** سيجعلها تعمل كما لو كانت الآلة **B** بالتحديد ويوجد بالمثل برنامج آخر يجعل **B** تعمل بالتحديد كالآلة **A** . وقد استخدمنا كلمة " بالتحديد " هنا للإشارة إلى أن الآلتين تتكافآن إذا تطابقت مخرجاتهما بالنسبة لأي مدخلات معطاة (لقمت فيهما بعد تلقيمهما بالبرمجيات المحوِّلة) **بصرف النظر عن الزمن** الذي يمكن أن تستغرقه كل آلة لإنتاج مخرجاتها. كما نقبل هنا أيضا بأنه إذا منيت أي من الآلتين بنقص في مكان مخزونها يمنعها من القيام بحساباتها ، فعندئذ يمكنها أن تستعين بتزويد خارجي (غير محدود مبدئياً) من " ورق المسودة " الذي يمكن أن يأخذ شكل شريط مغنطيسي أو قرص أو

طمبور أو أي شيء آخر . أما الاختلاف في الزمن الذي يمكن أن تستغرقه كل من الآلتين A و B في انجاز مهمة ما ، فكان من الممكن في الواقع أن تكون له أهمية جدية ، كأن يكون هذا الاختلاف ناشئا عن أن A أسرع بأكثر من ألف مرة من B في إنجاز مهمة معينة . كما كان يمكن أن تكون هناك ، في حال الآلتين نفسيهما ، مهمة أخرى تكون B بأدائها أسرع بألف مرة منA . زد على ذلك أن هذه المعايرة للأسرع يمكن أن تتوقف بشدة على اختيارنا لبرنامج التحويل المستعمل . وبما أننا نناقش الأمور هنا من الناحية المبدئية البحتة فلا تهمنا الأمور العملية ، مثل إنجاز الحسابات في زمن معقول . وفي الفصل الثاني، سأتوخى دقة أكثر في عرض المفاهيم التي أشرت إليها هنا . من ذلك مثلا أن الآلتين A و B هما مثالان عما يدعى «**آلات تورنغ العامة**».

والحقيقة أن كافة الحواسيب الحالية ، العامة الأغراض ، هي آلات تورنغ عامة ، لذلك يكافيء كل واحد منها الآخر بالمعنى الذي تقدم ذكره. فيمكن إذن أن نعزو الفروق بينها كلياً إلى البرمجيات، بشرط ألا نبالي بالفروق في سرعة إجراء العمليات ، ولا في محدودية فضاء التخزين . ولكن التقانة الحديثة مكنت الحواسيب في الواقع من أداء معظم الأغراض اليومية بخفة وسعة في التخزين ، فلم يعد أي واحد من هذه الأمور العملية يمثل في الواقع أي عائق جدي لما نحتاجه عادة* ، بصورة أننا نستطيع أن ننظر إلى ذلك التكافؤ النظري الفعلي بين الحواسيب بأنه قائم أيضا على المسستوي العملي . إذ يبدو أن التقانة قد حولت المسائل الآكاديمية البحتة المتعلقة بالحواسيب المثالية إلى مسائل تمس مباشرة حياتنا كلها.

إن ذلك التكافؤ بين الآلات الحاسوبية الفيزيائية هو ، بحسب ما أستطيع أن أفهم ، من أهم العوامل التي تقوم عليها ضمنا فلسفة الذكاء الاصطناعي القوي . أما العتاد فهو قليل الأهمية نسبيا (أو ربما حتى غير مهم على الإطلاق). في حين أن البرمجيات أي ، البرامج ، أو الخوارزميات، هي التي تتخذها مقوما حيويا لبنائها . ومع ذلك ، هناك أيضاً كما يبدو لي، عوامل مهمة أخرى أساسية في هذه الفلسفة ، تأتي من ناحية الفيزياء ، وسأحاول أن أشير هنا إلى هذه العوامل.

ترى ما الذي يعطي شخصاً معينا هويته الفردية ؟ أهو إلى حد معين الذرات نفسها التي يتكون منها جسده ؟ أم أن هويته تتوقف على الإلكترونات والبروتونات والجسيمات الأخرى التي وقع عليها الاختيار لتكوين هذه الذرات ؟ الواقع أن هذا غير ممكن لسببين على الأقل : أولهما و أهمهما ، أن مواد جسم أي شخص حي تتبدل باستمرار. وهذا ينطبق بوجه خاص على خلايا دماغه ، على الرغم من أن الدماغ لا تتكون فيه خلايا جديدة بعد الولادة.

---

* انظر مع ذلك دراسة نظرية التعقيد وصنف المسائل NP في نهاية الفصل الرابع.

فالأكثرية الواسعة إذن من ذرات كل خلية حية (بما في ذلك كل خلية من خلايا الدماغ) ـ بل، وعملياً ، جميع مواد جسمنا ـ تبدلت مرات عديدة منذ الولادة.

و أما السبب الثاني فيأتي من الفيزياء الكمومية ـ وهو مضحك بغرابته ، لأنه سيبدو مناقضاً للأول إذا ما التزمنا الدقة ! إذ ينجم عن ميكانيك الكم أنه لا بد لكل إلكترونين من أن يكونا متماثلين حتماً تماثلاً تاماً. وهذا ما سنرى المزيد عنه في الفصل السادس ص 330 والأمر نفسه يسري على أي بروتونين، وأي جسيمين أيا كانا ومن نوع واحد. ولا يعني قولنا هذا فقط أنه ما من طريقة نعرف بها كل جسيم على حدة، بل إن قولنا يرمي إلى ما هو أبعد من ذلك بكثير. فمثلاً لو بادلنا أحد الإلكترونات في دماغ شخص ما، مع إلكترون من آجرة، لظلت حالة المنظومة (الدماغ والآجرة) هي **الحالة نفسها** كما كانت من قبل **بالتحديد** (11)، وليس فحسب أنه لا يمكن تمييزها عنها. وهذا الأمر نفسه يصح على البروتونات وعلى أي نوع آخر من الجسيمات وجميع الذرات والجزيئات ... إلخ. ولو استبدلنا بكافة المواد المكونة لشخص ما، ما يقابلها من جسيمات آجر منزله ، فلن يحدث إطلاقاً أي تبديل من أي نوع كان . لأن ما يميز الشخص عن منزله هو **النمط** الذي نظمت فيه مكوناته ، وليس فردية تلك المكونات نفسها.

وهذا ما قد يكون له مثيل في مستوي حياتنا اليومي المستقل عن ميكانيك الكم ، الأمر الذي أظهرته لي جلياً، عند كتابتي لهذا الكلام التقانة الإلكترونية التي مكنتني من طباعته (أي الكلام) على الحاسوب بواسطة معالج كلمات فإذا رغبت بتغيير إحدى الكلمات، كأن أحول مثلا كلمة " حساب " إلى " حسوب " أستطيع أن أقوم بذلك بوضع الحرف" و " مكان الحرف " ا " أو أختار بدلا من ذلك طباعة الكلمة كلها ثانية . فإذا فعلت الأخير ، هل تكون (ح) عندئذ هي نفسها كما كانت سابقاً ، أم أكون قد وضعت مكانها حرفاً مماثلاً ؟ وماذا بشأن الحرف "ب" ؟ وحتى لو اكتفيت بوضع " و " مكان " ا " بدلا من إعادة طباعة الكلمة، لمرت لحظة بين اختفاء " و " وظهور " ا " عند انغلاق الفجوة ، ووجدت معها (أحياناً على الأقل) موجة إعادة رصف الصفحة لأن وضع كل حرف تال (بما في ذلك"ب") يعاد تقديره . ثم عند إدخال (و) يعاد تقديره مرة أخرى . (ولكن يالرخص الحساب بلا عقل في عصرنا الحديث) . وفي جميع الأحوال ، إن **كافة** الأحرف التي أراها أمامي على الشاشة هي مجرد فجوات في مسار حزمة من الإلكترونات، لأن الشاشة بأكملها تمسح ستين مرة في كل ثانية، فلو أخذت أي حرف مهما كان، و وضعت مكانه حرفا مماثلاً له، فهل يظل الوضع هو نفسه بعد التبديل، أم لا يمكن تمييزه عنه فقط؟ إن تبني وجهة النظر الثانية (أعني لا يمكن "تمييزه فقط") باعتبارها تختلف عن الأولى (أعني "هو نفسه") هو كما يبدو حماقة، إذ يبدو أن الشيء المعقول على الأقل هو أن نصف الوضع بأنه هو نفسه حين تكون الأحرف هي نفسها . والأمر هكذا أيضاً في حال الجسيمات المتماثلة بالنسبة لميكانيك الكم . بمعنى أن

تبديل أي جسيم بآخر مماثل له يعني في الواقع أننا لم نغير في الحالة شيئا على الإطلاق ، أي يجب أن ننظر إلى هذا الوضع بالفعل بأنه هو نفسه كما كان. (ومع ذلك ، **ليس** التمييز تافها في الواقع في سياق ميكانيك الكم ، كما سنرى في الفصل السادس).

لقد سبق أن ذكرنا الملاحظات المتعلقة بتبدل الذرات المستمر في جسم شخص ما في سياق الفيزياء الكلاسيكية، لا الكمومية ، وعبرنا عنها مفترضين ضمنا أن لنا حق التأكيد على فردية كل ذرة، والحقيقة أن الفيزياء الكلاسيكية كافية في هذا المستوي الذي نعرض فيه الأمور، بصورة أننا لن نخطىء كثيرا إذا نظرنا إلى الذرات بأنها أشياء فردية. ولكن بشرط أن تكون الذرات ، في أثناء تجوالها ، بعيدة بعدا معقولا عن أمثالها المطابقة لها، فعندئذ **يمكن** اعتبارها كأنها تحافظ على هويتها الفردية ، إذ يمكن تعقب أثرها عندئذ باستمرار ، بصورة أن المراقب يمكن أن يتخيل أنه وضع علامة على كل ذرة على انفراد . ولكن الحديث عن فردية الذرات من وجهة نظر ميكانيك الكم هو مجرد طريقة مبسطة للتعبير، مناسبة ومتسقة تماماً في المستوي الذي نحن فيه.

دعونا نسلم بأن لا علاقة لفردية أي شخص بأي فردية قد نحاول أن ننسبها إلى مكوناته كلاً منها بمفرده. في حين أنه يجب أن تكون لها ، بدلاً من ذلك، علاقة بمعنى ما مع **الشكل** أو (**الوضع النسبي**) الناشئ عن هذه المكونات ـ أو دعونا نقول : التشكل في الفضاء أو في الزمكان (وسنتحدث عن ذلك أكثر فيما بعد). ولكن أنصار الذكاء الاصطناعي القوي يذهبون إلى أبعد من ذلك، فهم يدعون بأنه إذا أمكن لمضمون هذا التشكل من المعلومات أن يترجم إلى شكل آخر يمكن أن يسترد فيه الشكل الاصلي ثانية، فعندئذ يجب أن تظل فردية الشخص على حالها. أي أن محتوى تشكله من المعلومات يشبه سلسلة الأحرف التي ضربتها لتوي على الآلة والتي هي معروضة الآن أمامي على شاشة الحاسوب. فإذا أزلت هذه الأحرف عن الشاشة ، تبقى مرمزة في شكل انحرافات معينة ضئيلة للشحنة الكهربائية ، وفي تكوين لا يشبه هندسياً الأحرف التي ضربتها لتوي . ومع ذلك ، يمكنني ، متى شئت، أن أعيدها إلى الشاشة لتصبح هناك وكأنه لم يحدث أي تحويل . وإذا رغبت في تخزين ما كتبته أستطيع عندئذ أن أحول معلومات سلاسل الأحرف إلى تشكيلات من المغنطة على قرص يمكنني بعدئذ نقله (حين أشاء)، ثم أبطل ـ بقطع التيار عن الحاسوب ـ جميع انحرافات الشحنة الضئيلة فيه (ذات العلاقة). وفي اليوم التالي، أستطيع أن أعيد إدخال القرص و انحرافات الشحنة الصغيرة إلى موضعها ، فأعرض سلسلة الأحرف بتعاقبها نفسه ثانية على الشاشة، و كأن شيئا لم يحدث قط . وبهذه الطريقة بالتحديد ، يمكن " كأمر واضح " عند أنصار الذكاء الاصطناعي القوي، أن نعامل فردية الشخص . بمعنى أنها مثل سلاسل الأحرف على شاشة العرض ، لا شيء يضيع منها ، أي لا يمكن أن يحدث للشخص في الواقع أي شيء على الإطلاق فيما لو ترجم شكله الفيزيائي إلى شيء آخر مختلف كل الاختلاف، كأن يصبح حقول تمغنط في كتلة من

الفولاذ . حتى ليبدو أنهم يدعون بأن الوعـي الشـاعر المليء بالأحاسيس عند هـذا الشـخص سيظل قائما حين تكون " المعلومات " المحددة لتكوينه في هذا الشكل الآخر . فيجـب أن يعتـبر " وعـي الشـخص " بحسـب هـذه النظـرة ، هـو فعـلا أحـد الـبرامج في البرمجيـات . أمـا تجليـه (أو ظهوره) في مظهر كائن بشري خاص فيجب أن ينظر إليه بأنه نتيجة تنفيذ هـذا البرنـامج على العتاد الذي يتكون منه دماغه وجسده.

يبدو أن السبب الذي دعا أنصار الذكاء الاصطناعي القوي إلى هذه المزاعـم هـو أنـه مهمـا كان الشكل المادي الذي يتخذه العتاد ــ كأن يكون آلة إلكترونيـة مـن نـوع مـا ـــ فـإن المـرء يستطيع دائما "أن يسأل" أسئلة البرمجيات (أي علـى طريقـة اختبـار تورنـغ). فـإذا فـرض ، في الوقت نفسه ، بأن العتاد يقوم بحساب الردود على هذه الأسئلة مـن دون أخطـاء،عندئـذ تـأتي الردود مطابقة للتي سيرد بها الشخص حين يكون في "حالته الطبيعية".(مثال: كيف تشعر هــذا الصباح ؟ " ؛ " آه أشعر بحالة جيدة جداً، شكراً، على الرغـم مـن الصـداع الخفيـف المزعـج". فـأنت لا تشـعر إذن بـأن هنـاك ... آه ... أي شـيء جديـد في هويتـك الشـخصية ... أو أي شيء؟ . " كلا ، لماذا تقول ذلك ؟ يبدو سؤالك غريبـا نوعـا مـا ، لأنـه لا يسـأل عـادة " ... " فأنت تشعر إذن أنك الشخص نفسه الذي كنته البارحة ؟ " طبعا أشعر" ..)

لقد نوقشت بكثرة، في هذا السياق، فكرة من الخيال العلمي **هي آلة النقـل الضوئـي**(12). والمقصود بذلك هو وسيلة للانتقال مثلاً من كوكب إلى آخر . أمــا هـل مـن الجـائز أن تكـون فعلا كذلك فهذا ما انصبت عليه المناقشات كلها. لأن الراغب في الرحيل فيها لا ينقل جسـديا بالطريقة " العادية " في مركبة فضائية، وإنما يمسح من رأسه إلى أخمص قدمه ويسجل بـالتفصيل الكامل وبكل دقة موضع ونـوع كـل ذرة و كـل إلكـترون، ثـم ترسـل هـذه المعلومـات كلهـا شعاعياً (بسرعة الضوء) على شكل إشارة كهرطيسية إلى الكوكـب البعيـد المقصـود الذهـاب إليه. وهناك تجمع هذه المعلومات لكي يستفاد منها في صنـع نسـخة دقيقـة للمسـافر، مـع كـل ذكرياته ونواياه وآماله وأعمـق مشـاعره . وهـذا علـى الأقـل مـا هـو منتظـر فيمـا لـو تم أخـذ المعلومات بأمانة عن كل حالة من حالات دماغه بالتفصيل ونقلت وأعيد بناؤها. فـإذا افترضنـا جدلاً أن هذه الآلية قد تم صنعها ، فسـيكون بالإمكـان إتـلاف النسـخة الأصليـة مـن دون أي خطر .وهنا يتبادر طبعا السؤال التالي : هل هذه *حقاً* طريقة للانتقــال مـن مكـان إلى آخـر، أم أنها مجرد بناء نسـخة جديـدة، مـع قتـل النسـخة الأصليـة ؟ هـل *أنـت* أخـي القـارىء مستعد لاستعمال هذه الطريقة للسفر ــ هذا علـى فـرض أنـه أثبـت أن الطريقـة موثوقـة كـل الثقـة في حدود صلاحيتها ؟ وإذا *لم* يكن النقل الضوئي رحيلاً، فما الفرق عندئذ مبدئياً بينه وبـين السـير فحسب من غرفة إلى أخرى ؟ أفليست ذرات الشخص في حالـة السـير هـي، في كـل لحظـة ، مجرد مزود بالمعلومات عن توضع ذرات اللحظة التالية ؟ لقد رأينا على كـل حـال أن لا معنـى للاحتفاظ بهوية أي ذرة خاصة ، بل إن هوية أي ذرة خاصة ، هــي مسـألة لا معنـى لهـا ، فيـا

ترى ألا يكون أي شكل متحرك من الذرات نوعاً من موجة معلومات تنتشر من مكان إلى آخر ؟ وما الفرق الأساسي بين انتشار الأمواج التي تصف سيرنا المتمهل بطريقة مألوفة من غرفة إلى أخرى ، وانتشار الأمواج الذي يحدث في وسيلة النقل الضوئي ؟

لنفرض صحة القول إن النقل الضوئي " يعمل " ***فعلاً*** ، بمعنى أن المسافر يعاد فعلا إيقاظ " وعيه " الخاص في النسخة المكونة عنه على الكوكب البعيد (مفترضين بأن مسألتنا هذه لها معنى أصيل) فيا ترى مالذي سيحدث لو أن نسخة المسافر ***الأصلية*** لم تتلف بحسب ما تتطلبه قواعد هذه اللعبة ؟ هل سيكون وعيه في موضعين في آن واحد؟ (حاول أخي القارىء أن تتصور ردك فيما لو قالوا لك " أترى يا عزيزي ، لقد انتهى مفعول العقار الذي أعطيناه لك قبل الأوان ، أي قبل وضعك في الناقلة الضوئية وقبل أن نوفر غيره ؟ وهذا سوء طالع بسيط. ولكن لا أهمية لذلك. ومهما يكن من أمر ، فإنه لمايسرك حتماً ــ كما نرجو ــ أن تعرف بأن "الأنت" الآخر أه . أه ... أعني الشخص الذي هو " أنت " فعلاً، قد وصل الآن بأمان إلى كوكب الزهرة. وهكذا نستطيع أ، أ، أن نتخلص منك هنا ــ آ، أعني من النسخة الفائضة هنا. وسيتم ذلك طبعا من دون ألم ") . إن هذا الوضع يحيط به جو من المفارقة. ولكن هل في قوانين الفيزياء ما يجعل النقل الضوئي مستحيلاً مبدئياً ؟ ومن جهة أخرى ، ربما لا يوجد شيء ، مبدئياً ، يعارض نقل شخص ما ، ولا نقل شعوره بهذه الوسيلة . ولكن عملية "النسخ" هذه التي استخدمت ستحطم لا محالة النسخة الأصلية ؟ فهل من الممكن عندئذ أن يكون هذا الاحتفاظ ***بنسختين*** على قيد الحياة هو الشيء المستحيل مبدئياً ؟ إني أقر بما في هذه الآراء من طبيعة وحشية. ومع ذلك ، أعتقد أننا قد نجد فيها شيئاً ذا قيمة يمكن تحصيله عن الطبيعة الفيزيائية للشعور و الشخصية. كما أعتقد أنها تعطينا مؤشراً واحداً يدل على وجود دور ***أساسي لميكانيك الكم*** في فهم الظواهر العقلية. ولكني بذلك أستبق الأمور، فهذه المواضيع سأضطر للعودة إليها بعد أن أدرس بنية نظرية الكم في الفصل السادس (راجع الصفحة 322).

دعونا نرى كيف ترتبط وجهة نظر الذكاء الاصطناعي القوي بمسألة النقل الضوئي. سأفترض أنه في مكان ما بين الكوكبين توجد محطة ترحيل تختزن فيها المعلومات مؤقتاً ريثما تنقل إلى غايتها النهائية . ولما كان من غير المناسب أن تختزن بصورة إنسانية، لذلك ستختزن في أداة مغنطيسية أو إلكترونية. فيا ترى هل سيكون وعي المسافر حاضراً ومرفقاً بهذه الأداة؟ إن هذا ما يريد منا أنصار الذكاء الاصطناعي القوي أن نصدقه. وسيقولون لنا، في نهاية الأمر، إن بإمكان الأداة أن تجيب عن أي سؤال أمكن اختياره لعرضه على المسافر، وذلك بجعلها فقط تحاكي نشاط دماغه بالصورة المناسبة وستحتوي الأداة على كافة المعلومات الضرورية، وما يتبقى فهو مسألة حساب. ولما كانت الأداة هي التي ستجيب عن الأسئلة وكأنها المسافر نفسه بالضبط، ***فهي إذن*** (بحسب اختبار تورنغ) التي ستكون المسافر. والسبب في ذلك راجع إلى الرأي الذي يدافع عنه أنصار الذكاء الاصطناعي القوي، وهو أن العتاد الراهن لا أهمية له

بالنسبة للظواهر العقلية. وهذا رأي كما يبدو لي غير عادل، إنه يقوم على افتراض مسبق بأن الدماغ (أو العقل) هو في حقيقته حاسوب رقمي. ويفترضون أيضاً أنه عندما يفكر المرء، فإن هذا التفكير لا يستدعي ظواهر فيزيائية من نوع خاص قد تتطلبها بنية الفيزياء (أو البيولوجية، أو الكيمياء) الخاصة الموجودة في الدماغ.

لاشك أنه من الممكن (من وجهة نظر الذكاء الاصطناعي القوي) محاولة اثبات بأن الفرض الوحيد الذي سيتوجب فرضه فعلاً هو أنه من الممكن دائما أن ***نصوغ*** بدقة، بحسابات رقمية، ووفقاً لنموذج معين، آثار أي ظاهرة فيزيائية سنحتاج لاستدعائها. بل إني أشعر بكل يقين أن معظم الفيزيائيين سيقولون إن هذا الفرض في الحقيقة هو فرض طبيعي جائز جداً اعتماداً على فهمنا الحالي للفيزياء. أما وجهة نظري الخاصة المعارضة، فسأقدمها في فصول تالية (حيث سأحتاج أيضاً لأن أمهد للسبب الذ ي يدعوني للاعتقاد بأنه لم يوضع حتى الآن أي فرض قيم) . ولكن دعونا نسلم هنا ، مؤقتا فحسب، بوجهة النظر هذه (الشائع تبنيها) وهي أن كافة الفيزياء ذات العلاقة ***يمكن*** أن تصاغ دائماً بحسابات رقمية. فالفرض الحقيقي الوحيد إذن (بغض النظر عن مسألتي زمن الحسابات وحجمها) هو الفرض " العملي " القائل ***إذا أدى*** شيء،بكل معنى الكلمة، دور كيان واع (أوشاعر) فعندئذ علينا أن نقر أن هذا الشيء يشعر أنه هو هذا الكيان.

وتصر وجهة نظر الذكاء الاصطناعي القوي على أن أي فيزياء تستدعيها فعلاً أعمال الدماغ ، يمكن محاكاتها بمداخلة برمجيات تحولها تحويلا مناسباً إلى حسابات بما يتفق مع نوع العتاد المستخدم (لأن المسألة كلها في الأساس انحصرت في نظرهم بمسألة العتاد). فإذا سلمنا بوجهة النظر العملية (الإجرائية) عندئذ تبقى المسألة متوقفة على تكافؤ آلات تورنغ العامة، و على حقيقة أن أي خوارزمية يمكن أن تنجزها هذه الآلات [وذلك على افتراض أن الدماغ يعمل عمله وفق نوع من أنواع تنفيذ الخوارزميات] .والآن حان الوقت بالنسبة لي كي أوضح هذه المفاهيم الهامة الخلابة.

الملاحظات

1 ـ أنظر مثلاً (1958 Gardner) ، (1981 Gregory) وبعض المراجع المذكورة فيها.

2 ـ أنظر مثلاً (Resnikoff وWells 1984) ص. 181-184 وللاطلاع على عباقرة الحساب الكلاسيكي عامة أنظر (1892 Rouse Ball) وكذلك (1983 Smith).

3 ـ أنظر (1981 Gregory) ص 285-287 و (953 Grey Walter).

4 ـ هذا المثال مقتبس من Delbruck (1986).

5 ـ راجع مقالاتO'Connell (1988) ومقالاتKeene (1988) . ولمزيد من المعرفة عن حاسوب الشطرنج راجع Levy (1984).

6 ـ إن معظم مسائل الشطرنج يجري إعدادها لكي تضع أمام اللاعبين **الآدميين** صعوبات معقدة. وقد لا يكون من الصعب على الأرجح تصور مسألة ليس من العسير جداً على الأشخاص أن يحلوها، في حين أن الحواسيب لن تستطيع أن تستوضحها حتى ولو أعطيت ألف عام. (ولا بد أن هذه المسألة ستكون من سوية سهلة نسبياً ملائمة تحتاج إلى نقلات عديدة. إذ من المعروف أن بعض المسائل تتطلب ما يقرب من 200 نقلة لحلها). إعلان للهواة!

7 ـ لقد تبنيت في هذا الكتاب تسمية " الذكاء الاصطناعي القوي " التي أطلقها سيرل على وجهة النظر المتطرفة هذه لكي أحدد ما أرمي إليه . وسيتردد التعبير (دالاتية) كثيراً للدلالة أساساً على وجهة النظر هذه نفسها. لكن ليس بمثل هذا التخصص دائماً. ومن المؤيدين لوجهة النظر هذه مينسكيMinsky (1968)، فودر Fodor (1983) وهوفستادر Hofstadter (1979).

8 ـ لرؤية مثال على هذا الادعاء ، أنظر سيرل (1987) ص211

9 ـ يشتكي د. هوفستادرDouglas Hofstadter في نقده لبحث سيرل الأصلي ، كما أعيد طبعه في كتابه (The Mind's I)، (أنا العقل) أن الإنسان لا يستطيع أن يعرف بطريقة يمكن تصورها الوصف الكامل لداخل عقل إنسان آخر ، وذلك للتعقيد المشتبك بهذه المسألة . وهذا ما لا يستطيعه فعلاً ! ولكن هذه ليست هي المشكلة بحذافيرها . فالواحد منا لا يعنى إلا بتنفيذ ذلك الجانب من خوارزمية يزعم أنه يستوعب حدوث حادثة عقلية وحيدة . وهذا ما كان يمكن أن يكون في مجرد "عمل واع " يحققه المرء بسرعة في الإجابة عن أحد أسئلة اختبار تورنغ ، أو كان يمكن أن يكون شيئاً أسهل. فهل ستتطلب يا ترى مثل هذه الحادثة بالضرورة، خوارزمية مذهلة في تعقيدها ؟

10 ـ أنظر الصفحات 368 ، 372 في مقا لة سيرل (1980) في كتاب (Hofstadter وDennette 1981)

11 ـ يمكن لبعض القراء ممن لديهم معارف حول هذه الأمــور أن يـنزعجوا بشـأن وجـود فـرق معين في الإشارة. ولكن هذا الفارق (القابل للجدل) نفسه يختفي إذا أدرنا أحد الإلكترونين دورة كاملة 360 درجة حين نبادل بينهما (لتفسير ذلك أنظر الفصل 6 ص (330).

12 ـ أنظر مدخل كتاب Hofstadter و Dennett (1981).

الفصل الثاني

الخوارزميات وآلات تورنغ

أساس لتوضيح مفهوم الخوارزمية

ما المقصود بالتحديد من قولنا : خوارزمية، آلة تورنغ، آلة تورنغ عامة ؟ لماذا كانت هذه المفاهيم أساسية جداً بالنسبة لوجهة النظر الحديثة حول ما يمكن أن يكون "أداة للتفكير"؟ هل ثمة حدود مطلقة لما يمكن أن تنجزه من حيث المبدأ خوارزمية ما ؟ لابد لنا لكي نوجه هذه الأسئلة في وجهتها الصحيحة ، من التمعن في فكرة خوارزمية وآلات تورنغ بشيء من التفصيل.

سأحتاج أحياناً في ما يلي من مناقشات للاستناد إلى عبارات رياضية. وأعرف مسبقاً أن بعض القراء سينفرون من هذه الأشياء ، أو ربما سيجدونها مرعبة . فلتسامحني أيها القارئ إذا كنت من هؤلاء، وأوصيك باتباع النصيحة التي قدمتها في الصفحة 16 تحت عنوان " كلمة موجهة إلى القارىء ". ومع ذلك، لا تتطلب الرياضيات المعروضة هنا معرفة أعمق مما في المدرسة الابتدائية. ولكن لا بد لاتباعها بالتفاصيل من بعض التفكير الجدي. ثم إن العرض بمعظمه واضح كل الوضوح، ويمكن بمتابعة التفاصيل الوصول إلى فهم جيد. ولكن يمكن للقارىء أن يجني الكثير أيضاً فيما لو اكتفى بتصفح الحجج للحصول على مذاقها فحسب . أما إذا كنت أيها القارىء، خبيراً، فعندئذ أسألك السماح أيضاً، إذ إن لدي شعوراً بأن اطلاعك الإجمالي على ما توجب علي قوله، جدير أيضاً بأن تبدد فيه شيئاً من وقتك، فقد تجد فيه أمراً أو إثنين يثيران اهتمامك.

لقد أتت كلمة algorithm " خوارزمية " من اسم رياضي القرن التاسع أبو جعفر [x] محمد بن موسى **الخوارزمي** الفارسي الأصل [+] الذي ألف في ما يقرب من العام 825 كتاباً كان له أثره في الرياضيات تحت اسم "الجبر والمقابلة. ". وكلمة " algorithm " بالإنكليزية تهجى اليوم

---

[x] الاسم الحقيقي لمؤلف " الجبر و المقابلة " هو أبو عبد الله محمد بن موسى و ليس أبو جعفر. أو هكذا ورد في الموسوعة الميسرة.

[+] النسبة خوارزمي تعني أنه قدم إلى بغداد من المنطقة التي كانت تسمى قبل الإسلام امبرطورية خوارزم وتضم جزءا من إيران وأوزبكستان و قرغيزية ، فليس من الضروري أن يكون فارسياً . ولكنه كان يتكلم العربية و يعرف الهندية . ثم إن أوزبكستان تحتفل به كأحد أبنائها . فقد يكون تركماني الأصل . ومهما يكن من أمر فقد كتب كل أعماله باللغة العربية و في ظل الحضارة العربية الإسلامية.

بطريقة تختلف عن القديمة الأكثر دقة و هي " algorism " ويبدو أن الجديدة ، أتت من التداعي الذي تثيره مع كلمة arithmetic (حساب). (والجدير بالذكر أيضا أن كلمة "algebra " بالإنكليزية أتت من الكلمة العربية " الجبر " التي ظهرت في عنوان كتابه).

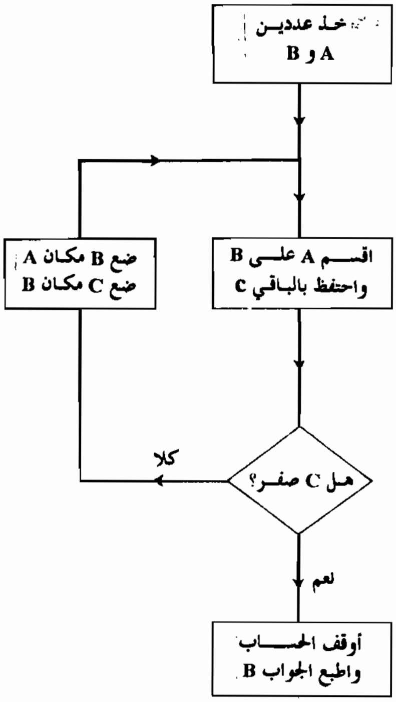
على أن هناك شواهد على أن الخوارزميات، كانت قد عرفت قبل كتاب الخوارزمي بزمن طويل، ومن أشهرها ذاك الذي يرجع إلى أيام اليونانيين القدماء (300 ق.م)، ويشار إليه الآن باسم **خوارزمية إقليدس** وهي تستخدم لإيجاد القاسم المشترك الأعظم لعددين، فدعونا نرى كيف يسير العمل فيا. لنأخذ عددين خاصين، فهذا أنفع لنا، وليكونا (1365) و (3654). إن القاسم المشترك الأعظم لعددين هو أكبر الأعداد التي تقسم كلاً من العددين قسمة تامة (من دون باق)، وهو طبعا عدد وحيد. ولكي نطبق خوارزمية إقليدس، نقسم أحد العددين المعطيين على الآخر ونأخذ الباقي : فالعدد 3654 يحوي مرتين من العدد 1365 والباقي 924 (= 1365 ×2 − 3654) والآن نستبدل بالعددين الأصليين ، الباقي 924 مع أحد العددين وليكن 1365 (لأن الأصغر أسهل)، ونكرر ما فعلناه باستخدام هذين العددين الجديدين ، فنجد أن 1365 يحوي مرة واحدة من 924 والباقي 441. الأمر الذي يؤدي أيضاً إلى عددين جديدين 441 و 924 . نقسم 924 على 441، فنحصل على الباقي 42 وهكذا دواليك إلى أن نحصل على قسمة مضبوطة (من دون باق). فإذا أدرجنا هذا العمل في قائمة، نحصل على:

3654 ÷ 1365 يعطي الباقي 924
1365 ÷ 924 يعطي الباقي 441
924 ÷ 441 يعطي الباقي 42
441 ÷ 42 يعطي الباقي 21
42 ÷ 21 يعطي الباقي 0

فالعدد الأخير الذي قسمنا عليه ، أي 21 هو القاسم المشترك الأعظم المطلوب.

إن خوارزمية إقليدس هذه نفسها هي ***النهج النظامي*** الذي نجد به هذا القاسم . ولقد طبقنا هذا النهج على عددين خاصين، ولكنه في الحقيقة نهج عام يطبق على أي عددين من أي قدر، وإن كان تطبيقه قد يحتاج، في حال الأعداد الكبيرة جداً، إلى زمن طويل، وكلما كان العددان أكبر، احتاجا إلى زمن أطول . ولكن هذا المنهج لابد أن ينتهي أخيراً إذا كانت الحالة ***محددة***. وسنحصل أخيراً، و في عدد منته من المراحل، على إجابة معينة . أما الإجراء الذي يجب القيام به في كل مرحلة فهو واضح كل الوضوح ، كما أن اللحظة المناسبة التي يجب أن نقرر فيها أن العملية كلها قد انتهت ، هي أيضا واضحة كل الوضوح . وعلاوة على ذلك ، يمكن أن نعرض شرح النهج بكامله بعبارات **منتهية**، على الرغم من كونه ينطبق على أعداد طبيعية لا

حدود لقدرها . (والمقصود "بالأعداد الطبيعية"(1) هو ببساطة، كامل الأعداد المألوفة غير السالبة (0، 1 ، 2 ، 3 ، 4 ، 5 ، 6 ، 7 ، 8 ، 9 ، 10 ، 11 ، ....). لأن من السهل بالفعل تنظيم " مخطط إجراءات " Flow Chart (منته) لوصف إجراءات خوارزمية إقليدس بأكملها (أنظر المخطط التالي):



يجب أن نشير إلى أن هذا النهج لا يزال غير محلل إلى أبسط أجزائه لأن من المفروض ضمنا أننا " نعرف" مسبقاً كيف نجري العملية الضرورية الأساسية للحصول على الباقي من قسمة عددA على عدد B . فهذه العملية هي أيضاً خوارزمية ــ وتجري بطريقة التقسيم المألوفة جداً، والتي تعلمناها في المدرسة . وهذه الطريقة في الحقيقة أعقد من بقية مراحل خوارزمية إقليدس. ولكن من الممكن أن ننظم لها مخطط إجراءات. ويأتي أهم تعقيد فيها من أننا نلجأ عادة (كما هو مفروض مسبقاً) إلى كتابة الأعداد الطبيعية بحسب النظام العشري القياسي بصورة أننا نحتاج معها لادراج جميع جداول الضرب، مع الانتباه إلى الأعداد المحمولة [وذلك لكي نبحث فيها عن العدد الذي إذا ضرب بالمقسوم عليه حصلنا على حاصل القسمة] إلخ . فإذا استخدمنا الطريقة البسيطة ، وهي تعاقب n علامة من نوع ما ـ مثال ذلك النقط ● ● ● ● ● لتمثيل

الخمسة ـ وجدنا عندئذ أن إيجاد الباقي هو عملية خوارزمية بسيطة جداً . فللحصول على الباقي عند تقسيم **A** على**B** نلجأ فحسب إلى حذف التعاقب الذي يمثل **B** من ذاك الذي يمثل **A** ونكرر العملية إلى أن تبقى علامات لا تكفي لتكرار العملية مرة أخرى. فللحصول مثلا على الباقي عندما نقسم سبعة عشر على خمسة، نلجأ فحسب إلى حذف التعاقب ● ● ● ● ● من التعاقب ● ● ● ● ● ● ● ● ● ● ● ● ● ● ● ● ● على النحو التالي:

● ● ● ● ● ● ● ● ● ● ● ● ● ● ● ● ●

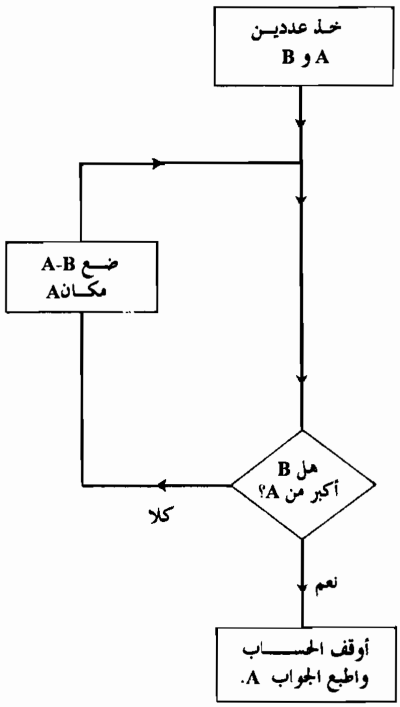
● ● ● ● ● ● ● ● ● ● ● ●

● ● ● ● ● ● ●

● ●

فالجواب هو اثنان لأننا لم نعد نستطيع تكرار عملية حذف الخمسة.

ويمكن رسم مخطط إجراءات لإيجاد باقي القسمة بطريقة الحذف المتكرر على النحو التالي:



ولكي يصبح مخطط إجراءات خوارزمية إقليدس كاملاً، نضع مخطط إيجاد الباقي السابق مكان المستطيل الموجود في أوسط يمين المخطط الأول . وهذا النوع من إبدال خوارزمية بأخرى هو إجراء شائع في برمجة الحاسوب. أما الخوارزمية السابقة لإيجاد باقي القسمة **فهي** مثال على ما يسمى إجراء جزئياً **subroutine**، وهي خوارزمية تكون في العادة معروفة مسبقاً فيستعان بها لاستخدامها في الخوارزمية الرئيسية لكونها جزءاً من عملها.

ولما كان تمثيل العدد **n** بمجرد تعاقب من النقط عملا غير مجد عند استخدام أعداد كبيرة، لذلك نلجأ عادة إلى استخدام تدوين مختصر كالنظام القياسي (العشري). ومهما يكن من أمر ، فنحن هنا لن نعبأ بفعالية العمليات أو التدوين . بل يعنينا بدلاً من ذلك، البحث **مبدئياً** عن العمليات التي يمكن القيام بها خوارزميا . هذا مع ملاحظة أن ما هو خوارزمية عند استخدام تدوين معين للأعداد، هو خوارزمية أيضاً عند استخدام تدوين آخر ، وأن الفروق الوحيدة تكمن في تفاصيل كل من التدوينين و في درجة تعقيده.

وخوارزمية إقليدس ليست سوى واحدة من طرق خوارزمية عديدة ــ كلاسيكية في معظم الأحيان ــ يمكن العثور عليها أينما كان في الرياضيات ، ولكن قد يلفت النظر، أنه، على الرغم من وجود أمثلة من نوع خاص تعود إلى أصول تاريخية قديمة عن الخوارزميات، إلا أن الصياغة الدقيقة **لمفهوم الخوارزمية العام**، ترجع فحسب إلى ***هذا*** القرن . ولقد قُدمت في الحقيقة شروح بديلة عديدة لهذا المفهوم ، وكلها في الثلاثينيات ، ولكن أكثرها بساطة **ووضوحاً** و إقناعاً، وأهمها تاريخيا أيضاً، هو الذي صيغ بلغة مفهوم يعرف باسم **آلة تورنغ** ، لذلك سيكون من المناسب لنا دراسة هذه " الآلات " بشيء من التفصيل.

هناك أولا شيء واحد يجب أن نتذكره دائما عند الحديث عن آلة تورنغ، وهو أن المقصود منها ليس شيئاً مادياً، وإنما " رياضيات مجردة " . وكان الرياضي الإنجليزي ، مفكك الشفرات الخارق ، والعالم الذي وضع علم الحاسوب، ألان تورنغ **Alan Turing** قد أدخل هذا المفهوم بين العامين 1933 ــ 1936 لكي يعالج مسألة واسعة الشمول تعرف بالألمانية باسم **Entscheidunsproblem**، وكان قد طرحها في أحد أوجهها الخاصة الرياضي الألماني العظيم د. هلبرت **David Hilbert** في عام 1900 في مؤتمر باريس العالمي للرياضيات (وهي العاشرة بين ما يعرف، بمسائل هلبرت العشر) ثم عرضها بطريقة أكمل في مؤتمر بولونية العالمي في عام 1928 (تورنغ 1937). وكان هلبرت يطالب في مسألته بنهج خوارزمي عام لحل المسائل الرياضية ــ أو بالأحرى، البحث عن جواب للسؤال : هل يمكن لمثل هذا النهج أن يوجد مبدئيا أم لا . وكان لدى هلبرت برنامج لبناء الرياضيات على أساس متين لا مطعن فيه، تكون له بديهياته وقواعد نهجه التي يجب أن تسلّم لها الرياضيات قيادها دفعة واحدة و إلى الأبد. ولكن في الوقت الذي كان تورنغ يبدع فيه عمله العظيم، كان هذا البرنامج (اي برنامج تورنغ لحل مسألة هلبرت) قد تلقى صفعة قوية من مبرهنة مروعة أثبتها عالم المنطق الألمعي

النمساوي كورت غودل **Kurt Godel** في عام 1931 وسنعمل في الفصل الرابع على دراسة مبرهنة غودل ومعانيها . وكانت مسألة هلبرت التي شُغل بها تورنغ ترمي إلى ما هو أبعد من كل صياغة خاصة للرياضيات بدلالة المنظومات البديهية. فقد كان سؤاله هو: هل ثمة **نهج *آلي*** عام يستطيع **من حيث المبدأ** أن يحل جميع مسائل الرياضيات الواحدة تلو الأخرى (المنتمية إلى صنف محدد تحديداً متقناً وبطريقة مناسبة).

وكان قسم من صعوبة الإجابة عن هذا السؤال يعود إلى البت في المعنى المقصود من " نهج آلي " . فهذا المفهوم لا ينخرط في عداد الأفكار الرياضية المألوفة في ذلك الوقت، لذلك حاول تورنغ أن يحدد المقصود منه و أن يتخيل كيف يمكن صياغة مفهوم " آلة " من هذا النوع بأن يحلل طريقة عملها بلغة أولية مفهومة . وهكذا يبدو جليا أن تورنغ كان ينظر أيضا إلى دماغ الإنسان بأنه نموذج من " آلة " بالمعنى الذي قصده . وأنه مهما تكن الفعاليات التي ينفذها الرياضيون من البشر عند معالجتهم لمسائلهم الرياضية ، فإن هذه المعالجات تندرج كلها تحت اسم " نُهُجٌ آلية."

أما نحن، فلسنا مضطرين بحال من الأحوال إلى مشايعة تورنغ في نظرته هذه إلى تفكير الإنسان، على الرغم من أنها كانت كما يبدو ، ذات قيمة كبيرة عنده في تطوير مفهومه البالغ الأهمية . فقد أثبت تورنغ ، بالفعل ، بعد أن حدد بدقة ما المقصود بنهج آلي ، بأن هناك عمليات رياضية معرفة بكل دقة ، ولا يمكن أن توصف ، بأي معنى متداول ، أنها آلية ! و ربما كان هناك شيء من السخرية في حقيقة أن هذا الجانب من عمل تورنغ نفسه يوفر لنا بصورة غير مباشرة منفذاً محتملاً نحو وجهة نظره الخاصة في طبيعة الظواهر العقلية. على أن هذا الأمر لا يعنينا الآن، بل نحتاج في بادىء الأمر إلى إبراز مفهوم تورنغ عن المقصود بالفعل من إجراء آلي.

مفهوم تورنغ

لنحاول أن نتخيل أداة مخصصة لتنفيذ نهج حسابي (يمكن تعريفه تعريفاً منتهياً ذا طول محدود). فيا ترى ما هي الصورة العامة التي يمكن أن تتخذها هذه الأداة ؟ في الحقيقة يجب ألا نهتم كثيراً بجزئيات الآلة ، بل علينا أن نكون على استعداد للارتفاع قليلاً إلى المستوي المثالي المجرد ، إذ إن ما نفكر فيه في الحقيقة هو مجرد آلة رياضية مثالية. إن ما نريده لهذه الآلة، هو أن تكون لها مجموعة منقطعة من الحالات التي سنسميها الحالات الداخلية للأداة، والتي عددها ***منته*** (وإن كان هذا العدد يمكن أن يكون كبيراً جداً). ومع ذلك لا نود أن نحد من الحسابات التي ستقوم بها أداتنا مبدئياً . ولنذكر هنا خوارزمية إقليدس التي استعرضناها أعلاه. فليس ثمة، مبدئياً، حد لمقدار العددين اللذين تطبق عليهما هذه الخوارزمية. فالخوارزمية ــ **أو النهج** الحسابي العام ــ هي نفسها بالضبط، و لا أهمية لضخامة العددين. بل كل ما في الأمر أن

النهج سيستغرق في حال الأعداد الكبيرة جداً وقتاً أطول، وسيحتاج الحساب إلى كمية كبيرة من " الورق العادي " الذي يجب أن تجرى عليه الحسابات الفعلية. أما **الخوارزمية** فهي المجموعة **المنتهية** نفسها من التعليمات ، و لا أهمية لضخامة الأعداد.

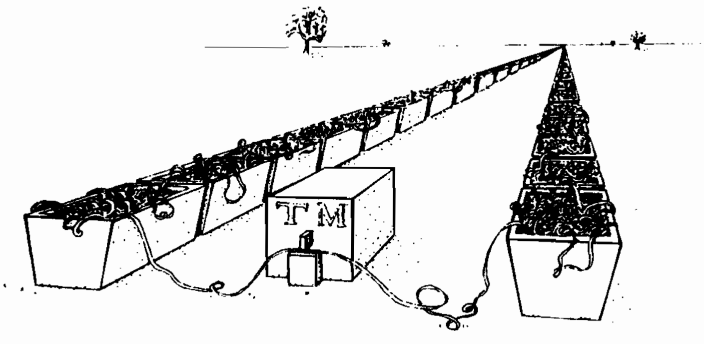
فأداتنا إذن، على الرغم من أن عدد حالاتها الداخلية منته ، لا بد لها من أن تكون قادرة على معالجة مدخلات لا يحد من مقدارها أي شرط ، كما يجب أن يتاح لها ، علاوة على ذلك، الاستعانة بفضاء تخزين خارجي غير محدود (من ورقنا العادي) لكي تقوم بحساباتها ، وأن تكون قادرة على إنتاج مخرجات لا حدود لمقدارها . ولما لم يكن لأداتنا سوى عدد منته من الحالات الداخلية المتمايزة ، فلا يمكن أن نتوقع منها أن " تستوعب بداخلها " جميع المعطيات الخارجية، ولا حتى جميع نتائج حساباتها الخاصة . لذلك يجب أن تكتفي، بدلا من ذلك ، بفحص أقسام المعطيات أو الحسابات السابقة التي **تعالجها حالياً**، ثم تقوم بعدئذ بجميع العمليات التي طلب منها أن تجريها عليها. وقد تدوّن، وربما في فضاء التخزين الخارجي، النتائج المتعلقة بهذه العملية ، ثم تسير في طريق مرسوم بدقة إلى مرحلة العملية التالية . فهذه الطبيعة غير المنتهية في مدخلات آلة تورنغ وفضائها الحسابي ومخرجاتها ، هي التي جعلتنا ننظر إليها بأنها مجرد تجريد رياضي لا بأنها شيء يمكن بناؤه عمليا في أرض الواقع (أنظر الشكل 2 ــ 1)، ولكنه تجريد على صلة وثيقة بموضوعنا ، في حين أن عجائب تقنيات الحواسيب الحديثة زودتنا بأدوات تخزين إلكترونية يمكن النظر إليها في الحقيقة بأنها غير محدودة بالنسبة لمعظم الأغراض العملية.

إن نمط فضاء التخزين الذي وصف في الدراسة أعلاه بأنه " خارجي " يمكن النظر إليه في الحقيقة بأنه جزء فعلي من أعمال الحاسوب الحديث الداخلية. ولكن القول بأن هذا الجزء من فضاء التخزين داخلي ، وإن هذا خارجي هو مسألة فنية بحته. واحدى الطرق التي يمكن بها التمييز بين " الأداة " والقسم " الخارجي " هي التعبير عنهما بمصطلحي **العتاد و البرمجيات.** فالقسم الداخلي، يمكن أن يكون عندئذ هو العتاد، والقسم الخارجي هو البرمجيات، وإن كنت **غير** مضطر للالتزام بذلك ، ولكن أيا كانت الطريقة التي ننظر بها إلى آلة تورنغ، فإنها، في وضعها المثالي ، قريبة بالفعل قرباً يلفت النظر من حواسيب اليوم الإلكترونية.

وكان تورنغ قد تصور بأن المعطيات الخارجية و فضاء التخزين ممثلة على شكل " شريط " عليه علامات . وتستدعي الأداة هذا الشريط و تقرؤه عند الضرورة، كما يمكن للأداة أن تحرك الشريط إلى الخلف و إلى الأمام، لكون ذلك جزءاً من عملها. كما يمكن للأداة أن تضع علامات جديدة على الشريط حين يكون ذلك مطلوباً، وبمقدورها أن تمحو علامات قديمة أيضاً، فتجعل بذلك الشريط نفسه يقوم بدور التخزين الخارجي (أعني ورقة عادية) مثلما يقوم بدور المدخلات. إذ من المفيد في الحقيقة ألا نترك أي تمييز واضح بين "التخزين الخارجي" و" المدخلات " لأن نتائج الحساب التي تظهر في أثناء كثير من العمليات، تقوم بدور مماثل تماماً

لدور المعطيـــات الجديدة . ففـي خوارزميـة إقليـدس، كمـا نذكـر، احتفظنـا بـالتعويض عـن مدخلاتنـا الأصليـة (العدديـن A و B) بنتـائج الحسـاب في مختلـف المراحـل. وهكـذا يمكـن، بطريقة مماثلة، استخدام الشريط نفسه للمخرجات النهائية (أعني "الجواب")، ويظـل الشـريط يجري ذهاباً وإياباً عبر الأداة طالما أن هناك حاجة للقيام بمزيد مـن الحسـابات. وحينمـا يكتمـل الحساب أخيرا ، تتوقف الآلة ، وتعرض نتيجة الحساب على جزء الشريط الذي يقع على أحـد جانبي الأداة. ولتجنب الالتباس دعونا نفترض أن الجواب يعرض دائماً على اليسار ، في حين أن جميع المعطيات العددية في المدخلات، إضافة إلى مواصفات المسألة المطلوب حلها ، تأتي دائمـاً من اليمين.

أما من جهتي، فأشعر بشيء من عدم الارتياح من أن أداتنا المحـدودة تحـرك إلى الخلـف وإلى الأمام شريطاً يمكن أن يكون لا نهاية لطوله. حقاً أنه يمكن جعل مادة الشريط خفيفة بقدر ما نشاء، ولكن تحريك شريط **لا متناه** أمر يمكن أن يكون صعباً! وأنا أفضّل أن أنظر إلى الشـريط بأنه يمثل وسطاً خارجياً يمكـن لأداتنـا المحـدودة أن تتجـول فيـه (أمـا في حـال الإلكترونيـات الحديثـة، فـلا " الشـريط " طبعـاً، ولا " الأداة " بحاجـة فعـلا " للحركـة " بـالمعنى الفيزيـائي المألوف، لكن هذه " الحركة " وسيلة مناسبة لتصور الأمور). فمن وجهة النظر هـذه، تسـتقبل الأداة جميع مدخلاتها من الوسط المحيط بها ، أي أنها تستخدم الوسط كما تستخدم " ورقتهـا العادية "، وفي النهاية تظهر مخرجاتها كتابة على هذا الوسط نفسه .



الشكل 2 ـ 1: تتطلب آلة تورنغ الحقيقية شريطا غير منته

يتألف الشريط بحسب تصور تورنغ مـن مربعـات متتاليـة خطيـا[علـى طـول الشـريط] وبصورة أنها غير متناهية في كلا الطرفين . ويكون كل مربع إما أبيض (فارغـاً) وإمـا يحـوي

علامة واحدة . كما يظهر استخدام المربعات المعلمة أو غير المعلمة بكل وضوح بأننا أبحنا لأنفسنا تقطيع الوسط (أي الشريط) لكي يوصف بدلالة عناصر منفصلة (حيث منفصلة عكس مستمرة). وهذا كما يبدو ، هو الشيء الذي يعقل عمله إذا ما أردنا لأداتنا أن تقوم بعملها بطريقة موثوقة ومحددة بكل صرامة . وإن كنا نجيز بذلك لمحيطنا (إمكانية) أن يكون لا نهائيا . وهذه السمة ـ على كل حال ـ هي ميزة للمعالجة الرياضية المثالية التي نستخدمها ، ولكن المدخلات و الحسابات و المخرجات، يجب أن تكون دائماً، وفي كل حالة خاصة، **منتهية** . لذلك يجب ألا يوجد سوى عدد منته من العلامات على الشريط ، على الرغم من أنه يؤخذ ذا طول لا متناه ، كما يجب أن يكون أبيض تماما بعد عدد معين من العلامات على كلا الجانبين.

سنشير فيما يلي للمربع الأبيض بالرمز " 0 " وللمربع المعلم بالرمز " 1 " أي كما يلي:

....	0	0	0	1	1	1	1	0	1	0	0	1	1	1	0	0	1	0	0	1	0	1	1	0	1	0	0	....

ونريد من أداتنا أن " تقرأ " الشريط ، و سنفرض أنها تقرأ مربعاً واحدا في كل مرة ، وأنها بعد كل عملية ، تنتقل مربعاً **واحداً** لا غير إلى اليمين أو إلى اليسار . وليس في هذا الانتقال المحدود أي انتقاص من العمومية.

أما الأداة التي تقرأ **n** مربعاً في كل مرة ، أو تنتقل **k** مربعاً في كل مرة، فيمكن أن نتصور بدلاً منها، وبسهولة أداة أخرى تؤدي العمل نفسه وتقرأ ، وتنتقل ، مربعاً واحداً في كل مرة. إذ يمكن تحقيق انتقال**k** مربعاً من **k** نقلة، تتألف كل نقلة منها من مربع واحد ، كما يمكن للأداة أن تتصرف عن طريق تخزين **n** قراءة، كل منها لمربع واحد وكأنها تقرأ **n** مربعاً كلها معاً.

ترى مالذي يمكن أن تقوم به هذه الأداة بالتفصيل ؟ و إذا كان ثمة شيء يمكن وصفه بأنه "آلي" فما هي أعم طريقة يمكن أن يؤدي بها هذا الشيء عمله ليحافظ على صفته " آلي "؟ لقد رأينا أن عدد الحالات الداخلية لأداتنا منته (أو محدود). وكل ما نحتاج إلى معرفته، غير هذه المحدودية، هو أن سلوك هذه الأداة يتعين بكامله بحالتها الداخلية و بالمدخلات. أما هذه المدخلات فقد بسّطناها حتى أصبحت واحداً من الرمزين " 0 " أو " 1 " فقط. كما أن الأداة ستقوم بعملها بطريقة محددة تحديدا كاملا بعد تعيين حالتها الداخلية و تلك المدخلات . فهي تغير حالتها الداخلية إلى حالة أخرى (أو تبقيها نفسها). وتضع مكان الـ " 0 " أو الـ " 1 "

* في الواقع أن تورنغ في وصفه الأصلي ، أجاز لشريطه أن يكون معلما بطرق أعقد من هذه، ولكن ذلك لا يؤدي إلى أي فرق حقيقي. فالعلامات الأكثر تعقيدا يمكن دائما تحليلها إلى متوالية من العلامات و المربعات البيضاء ،وسأجري فيما بعد أشكالا أخرى غير مهمة من التحريف في مواصفات تورنغ الأصلية.

الذي قرأته لتوها الرمز نفسه أو رمزا آخر " 0 " أو " 1 " وتنتقل مربعـا واحـدا إلى اليمـين أو إلى اليسار. وأخيراً تقرر إما أن تتابع الحساب أو تنهيه و تتوقف.

ولكي نعـرف العمـل الـذي تقـوم بـه أداتنـا بطريقـة واضحـة، دعونـا **أولاً نرقـم** حالاتهـا الداخلية. فلنرقمها مثلاً بالأرقـــام 0 ، 1 ، 2 ، 3 ، 4 ، ..... ، عندئذ يتعين العمل الذي تقوم بـه هذه الأداة ، أي **آلة** تورنغ ، تعييناً كاملاً بقائمة واضحة من التبديلات مثل:

00 → 00R
01 → 131L
10 → 651R
11 → 10R
20 → 01R.STOP
21 → 661L
30 → 370R
. .
. .
. .
2100 → 31L
. .
. .
. .
2581 → 00R.STOP
2590 → 971R
2591 → 00R.STOP

إن الرقم **الكبير** المكتوب إلى يسار السهم ، هو الرمز الموجود على الشـريط الـذي تقـوم الأداة بقراءته ، وهو الذي تضع مكانه الرقم الكبير الموجود في وسط اليمـين . أمـا **R** فتفيدنـا بـأن على الأداة أن تنتقل مربعا واحداً إلى **اليمين** على طول الشريط، كما أن **L** تفيدنـا بـأن علـى الأداة أن تنتقل خطوة واحدة إلى **اليسار**. (وإذا سرنا على مواصفات تورنـغ الأصليـة نتصـور عندئذ أن الشريط ينتقل بدلا من الأداة ، ونفسر **R** بأنها أمر بانتقال **الشريط** مربعاً واحـدا إلى **اليسار** و **L** بأنها انتقاله مربعا واحـدا إلى **اليمـين**). أمـا كلمـة **STOP** فتشـير إلى اكتمـال الحساب و أن على الأداة أن تتوقف. فالأمر الثاني مثلاً 01 → 131L يفيـد بأنـه إذا كـانت الأداة في حالتها الداخلية 0 وقرأت 1 على الشريط، عندئذ يجب أن تتغير إلى الحالة الداخلية 13 وتترك 1 على حاله 1 على الشـريط و تنتقل مربعاً واحداً على طول الشريط إلى اليســار . أمـا الأمر الآخير **2591 → 00R STOP** فيفيدنا بأنـه إذا كـانت الأداة في الحالـة الداخليـة 259

وتقرأ 1 على الشريط فعندئذ يجب أن تتغير إلى الحالة الداخلية 0 وتمحو 1 وتضع مكانه O على الشريط ثم تنتقل على طول الشريط مربعاً واحداً إلى اليمين و ينتهي الحساب.

قد يكون استخدام الرمزين o و1 فقط بدلاً من استخدام الأرقام 0 ، 1 ، 2 ، 3 ، 4 ، 5 .... لترقيم الحالات الداخلية ، أكثر انسجاماً إلى حد ما مع الطريقة المتبعة في تدوين العلامات على الشريط .فنستطيع مثلا إذا شئنا ، أن نستعمل تعاقبا للرمز 1 مكرراً **n** مرة لترقيم الحالة **n** ، و لكن هذه الطريقة غير مجدية ، فدعونا نستخدم بدلاً منها نظام الترقيم **الثنائي** الذي هو الآن طريقة مألوفة للتدوين، وإليكم أمثلة عنه:

0→ 0,
1→ 1,
2→ 10,
3→ 11,
4→ 100,
5→ 101,
6→ 110,
7→ 111,
8→ 1000,
9→ 1001,
10→ 1010,
11→ 1011,
12→ 1100,

إلخ.

ففي هـــــذا التدوين، يشير الرقم النهائي الأيمين إلى " الآحاد " كما في التدوين الشائع (العشري) . ولكن الرقم الذي على يسار رقم الآحاد مباشرة يشير إلى " الاثنينات " بدلاً من " العشرات " . ويشير الرقم الذي على يسار هذا الأخير إلى " الأربعات " بدلا من المئات، وما بعده يشير إلى " الثمانيات " بدلا من " الآلاف " وهكذا دواليك . فقيمة المراتب المتتالية، عند انتقالنا إلى اليسار ، هي **قوى العدد** 2 المتتالية ، أي 1 ، 2 ، (2 x 2=) 4؛(2 x 2 x 2=) 8، (2×2×2×2=) 16 ؛ (2×2 ×2 ×2×2=) 32 .... إلخ .

(سنجد أيضا في بعض الأحيان أن من المفيد استخدام أساس آخر للعد غير الإثنين وغير العشرة . وذلك لكتابة الأعداد الطبيعية ولاستخدامها في أغراض أخرى سنصل إليها فيما بعد. ففي الأساس **ثلاثة** مثلا . يكتب العدد المعطى بالترقيم العشري 64، هكذا 2101 حيث كل مرتبة لها قيمة هي الآن قوة للعدد 3. « $1 + (0x3^1) + (1x3^2) + (2x3^3) = 64$ ». (راجع الفصل الرابع، ص 143 الحاشية).

وهكذا فإن تعيين حالة آلة تورنغ المذكورة أعـلاه يصبـح الآن، باسـتخدام الـترقيم الثنـائي، كما يلي:

$$
\begin{aligned}
00 &\rightarrow 00R\\
01 &\rightarrow 11011L\\
10 &\rightarrow 1000011R\\
11 &\rightarrow 10R\\
100 &\rightarrow 01STOP\\
101 &\rightarrow 10000101L\\
110 &\rightarrow 1001010R\\
&\vdots\\
110100100 &\rightarrow 111L\\
&\vdots\\
1000000101 &\rightarrow 00STOP\\
1000000110 &\rightarrow 11000011R\\
1000000111 &\rightarrow 00STOP
\end{aligned}
$$

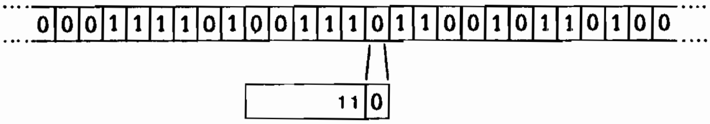
وفيما سبق اختزلت أيضاً **R. STOP** إلى **STOP**، لأننا نسـتطيع أن نفـترض بكـل ثقـة أن **L.STOP** لا يمكن أن ترد، إذ تعرض نتيجة الخطوة النهائية دائما إلى يسار الأداة لكونها جزءاً من الإجابة.

لنفرض أن أداتنا موجودة في الحالة الداخلية الخاصـة الممثلـة بالتسلسـل الثنـائي 11010010 و أنها منهمكة في حساب شريط كالذي ورد في ص 65 و قد بيناه فيما يلي (حيث نطبق عليه الأمر $_{11}1L \rightarrow 110100100$).

0	0	0	1	1	1	1	0	1	0	0	1	1	1	0	0	1	0	0	1	0	1	1	0	1	0	0

11010010	0

ويشار إلى الرقم الخاص الذي يقرأ على الشريط (وهو هنا الرقـم 0) بصـورة كبـيرة لهـذا الرقم واقعة على يمين متتالية الرموز التي تمثل الحالة الداخلية [أي يرسم أكبر من بـاقي الأرقـام. أنظر المستطيل السفلي في الشكل أعلاه .] ففي مثالنا هـذا الممثـل لآلـة تورنـغ الموصوفـة جزئيـا أعلاه (والذي نظّمته بطريقة كيفية إلى حد ما)، تضـع الأداة مكـان الــ 0 الـذي تقـرؤه هنـا الرقم 1 وتصبح حالتها الداخلية 11 بدلا مـن 11010010 وبعدئـذ يجـب أن تنتقـل الأداة خطـوة واحدة إلى اليسار (وذلك بحسب الأمر المعطى).



فتصبح الأداة الآن جاهزة لقراءة الرقم"0" الواقع على يسار الرقم 1 الذي وضعته ، وهـذا الرقم "0" يجب أن تتركه الأداة على حاله بحسب الأمر السابع المبين في الجدول ، و لكن تضع مكان الحالة الداخلية (11) الحالة 100101 ، وتنتقل بعدئذ على طول الشريط خطوة واحدة نحو اليمين . وعندئذ تقرأ (1) ثم لا بد أن يكون في مكان ما أسفل الأمر السابق أمر آخر يبين إلى أي حالة داخلية يجب أن تتغير الأداة ، و هـل ستغير الرقـم الـذي تقـرؤه أم لا ، وفي أي اتجـاه يجب أن تنتقل على طول الشريط . وهكذا تتابع الأداة عملها على هـذا المنـوال إلى أن تتوصـل إلى الأمر بالتوقف (**STOP**) . ولكي ينتبه مشغل الآلة بأن الحساب قد اكتمل ، دعونا نتخيـل وجود جرس يقرع عند توقف الآلة (بعد انتقالها خطوة زيادة ، إلى اليمين).

سنفرض بأن الآلة تبدأ دائماً وهي في الحالة الداخلية " 0 " و أن كل ما يـأتي مـن الشـريط عندئذ على يسار الرقم الذي تشير إليه الأداة هو أبيض . وأن جميع الأوامـر و المعطيـات واقعـة إلى اليمين. وكما ذكرنا سابقاً، يجب أن تأخذ هذه المعلومات التي لقنـت لـلإداة شـكل متتاليـة **منتهية** من الأصفار والوحدان[جمع الواحد] ، ثـم يلـي هـذه المتتاليـة شـريط أبيـض (أي "0" مكرر) وحين تصل الآلة إلى التوقف (STOP) ، تظهر نتيجة الحساب على الشـريط إلى يسـار آخر رمز تقرؤه الأداة بعد توقفها.

لا شك بأننا نود أن تكون لدينا طريقة لتضمين مدخلاتنا معطيات عددية لكي تكون جزءاً منها. لذلك لا بد لنا من طريقـة للتعبـير عـن الأعـداد العاديـة المتداولـة (اي الأعـداد الطبيعيـة 1 ، 2، 3 ، 4 ، 5 ، ....) لتكون جزءا من المدخلات . إن إحدى الطـرق لعمـل ذلـك ، قـد تكون ببساطة أن نستخدم متتالية من "1" مكررn مرة لتمثيل العدد **n** (علىى الرغم من أن هذا قد يخلق لنا صعوبة مع العدد الطبيعي صفر) .

$1 \rightarrow 1\ ,\ 2\rightarrow 11\ \ ,3 \rightarrow 111\ \ ,\ 4 \rightarrow\ 1111\ \ ,5 \rightarrow 11111$ --- --

يدعى هذا النظـــام البدائي للعـد النظـام **الواحـدي** (و إن يكـن ذلـك غـير منطقـي)[x]. فالرمز "O" (الذي لم يعد يستخدم هنا في كتابة الأعداد) يمكن استخدامه الآن ليكـون مسـافة فراغ تفصل بين كل عدد و آخر غيره، وهذا أمر مهم، لأننـا بحاجـة في هـذه الحالـة إلى وسـيلة تقوم بهذا الفصل، لأن الكثير من الخوارزميات تؤدي عملها على مجموعات مـن الأعـداد بـدلاً من مجرد عدد واحد. ففي حـال خوارزميـة إقليـدس مثـلا تحتـاج أداتنـا للعمـل علـى زوج مـن

---

[x] إنه غير منطقي لأنه لا يحوي مراتب و لا توجد فيه طريقة لتمثيل الصفر

الأعداد A و B . ويمكن أن نجد، ومن دون صعوبة كبيرة ، بعضا من آلات تورنغ تنفذ هذه الخوارزمية.

وربما كان هناك قراء ممن لديهم معرفة ، يحرصون على أن يتأكدوا على سبيل التمرين بأن الوصف المفصل التالي لآلة تورنغ (التي سأدعوها **EUC**) تنفذ بالفعل خوارزمية إقليدس عند تطبيقها على زوج من الأعداد مدونين بالنظام الواحدي ويفصل بينهما O:

00→00R, 01→11L, 10→101R, 11→11L, 100→10100R,
101→110R, 110→1000R, 111→111R, 1000→1000R, 1001→1010R,
1010→1110L, 1011→1101L, 1100→1100L, 1101→11L, 1110→1110L,
1111→10001L, 10000→10010L, 10001→10001L, 10010→100R,
10011→11L, 10100→00STOP, 10101→10101R.

على أنه قد يكون من الحكمة بالنسبة لأي قارىء كهذا أن يبدأ ، قبل الخوض في هذه العملية، بشيء أبسط منها، مثل آلة تورنغ **UN+1** أي (عدد واحدي + 1):

$$0O \rightarrow 0O\,R\,,\; 01 \rightarrow {}_1 1R\,,\; {}_1O \rightarrow 01\;stop\,,\; {}_1 1 \rightarrow {}_1 1R$$

فهذه الآلة تقوم بجمع واحد لعدد واحدي . وللتدقيق في أن **UN + 1** تقوم فعلا بذلك، دعونا نتصور أنها طبقت مثلاً على الشريط ...... 00000 1111 00000 ...... الذي يمثل العدد 4 . لنفرض أن الأداة كانت في البداية في مكان ما عند الأصفار إلى اليسار بعيداً عن أول 1 و أنها، في الحالة الداخلية o وهي تقرأ O . فهذا الـ O تتركه على حاله وفقاً للأمر الأول وتنتقل خطوة إلى اليمين وتبقى حالتها الداخلية o . ثم تظل تفعل ذلك و تنتقل خطوة إلى اليمين إلى أن تلتقي بأول 1 . وعندئذ يقوم الأمر الثاني بعمله : فتترك الأداة الـ 1 على حاله وتتحرك ثانية إلى اليمين ، و لكنها تكون قد أصبحت في الحالة الداخلية 1، فبسحب الأمر الرابع إذا التقت بـ 1 تبقيه على حاله وتنتقل إلى اليمين مع بقائها في الحالة الداخلية 1 إلى أن تلتقي بأول 0 يلي الوحدان فتطبق الأمر الثالث الذي ينص على تبديل 0 بـ 1 وتنتقل الأداة خطوة إلى اليمين وتتوقف (لأن **STOP**، كما نذكر تقوم مقام **R.STOP**) وهكذا يكون قد أضيف لمتتالية الوحدان (الممثلة للعدد 4) واحد جديد ، ويكون العدد 4 قد أصبح فعلا 5 كما هو مطلوب.

ويمكن للقارىء أن يتحقق على سبيل التمرين **الإضافي المجهد** إلى حد ما ، أن آلية الضرب **UN x 2** أي (عدد واحدي x 2) المعرفة كما يلي:

00→00R, 01→10R, 10→101L, 11→11R, 100→110R, 101→1000R,
110→01STOP, 111→111R, 1000→1011L, 1001→1001R, 1010→101L,
1011→1011L,

تضاعف أي عدد واحدي كما يراد منها.

ولفهم الفكرة المستخدمة في حالة **EUC** (إيجاد القاسم المشترك الأعظم بطريقة إقليدس) يمكن أن نجرب العملية على زوج معين و مناسب من الأعداد ، مثل 6 و 8 . ولتكن الأداة في الحالة **o** وأنها في البداية إلى اليسار كما في الأمثلة السابقة ، وليكن الشريط معلما الآن في بادىء الأمر على النحو:

.... 0000000 11111101111111110000000000 ......

فعندما تتوقف الأداة بعد العديد من المراحل ، نحصل على الشريط المعلم كما يلي:

...... 000011 000000000 ......

وفيه تشير الأداة (إلى الصفر) الواقع على يمين الأرقام المغايرة للصفر . وهكذا نجد أن القاسم المشترك الأعظم المطلوب هو 2 (و هذا صحيح) .

أما لماذا يقوم **EUC** (أوحتى**UN x 2**) حقيقة بما هو مفترض أن يقوم به فهذا شأن يتضمن شرحه المفصل بعض الأمور المرهفة، فضلاًعن أنه سيكون أعقد من الآلة نفسها ـــ و هذه سمة ليست غير شائعة في برامج الحواسيب ! (فلكي نفهم فهماً كاملاً لماذا يقوم نهج خوارزمي بما هو مفترض أن يقوم به ، نحتاج إلى بصيرة نافذة. فياترى هل البصيرة نفسها خوارزمية ؟ هذه مشكلة ستكون موضع اهتمام بالنسبة لنا فيما بعد) . ولن أحاول هنا تقديم شرح كهذا للمثالين **UNX2** و**EUC**. أما القارىء الذي يقوم بفحصهما حتى النهاية فسيجد أني تصرفت تصرفاً بسيطاً جداً في خوارزمية إقليدس الفعلية، وذلك لكي أشرح الأمور بمزيد من الإيجاز في مخطط الخوارزمية المطلوب. لا سيما أن عرض **EUC** أعقد أيضاً إلى حد ما، فهو يتضمن 22 أمرا أوليا لأجل 11 حالة داخلية مختلفة. والحقيقة أن معظم التعقيد هو من نوع تنظيمي محض. كما سيجد هذا الفاحص أن ثلاثة فقط من الأوامر هي التي تتضمن تبديل العلامة على الشريط! (وحتى في حال **UNx2** فقد استخدمت 12 أمراً، نصفها يتضمن تبديلا في العلامات).

الترميز الثنائي للمعطيات العددية

لا شك في أن استخدام النظام الواحدي سيكون غير مجد إلى أبعد الحدود في حالة الأعداد الضخمة ، لذلك سنلجأ عادة إلى استخدام النظام **الثنائي** للعد كما سبق شرحه.ولكن لو حاولنا قراءة الشريط بأنه مجرد عدد ثنائي لما استطعنا ذلك مباشرة : إذ لن تكون لدينا،بحسب ظروفنا،طريقة نعرف بها متى ينتهي تمثيل العدد بالنظام الثنائي ومتى يبدأ تعاقب الأصفار اللانهائي الذي يمثل القسم الأبيض من الشريط إلى اليمين . لذلك لا بد لنا من إشارة تدل على انتهاء التعبير الثنائي عن العدد. ثم إنه غالبا ما نحتاج إلى تلقين الشريط **عدة** أعداد ، كما في حالة زوج الأعداد (2) الذي تحتاجه خوارزمية إقليدس. وبحسب وصفنا للشريط لا نستطيع تمييز المسافات الفاصلة بين الأعداد من الأصفار أو متتاليات الأصفار التي تكون جزءاً من

التمثيل الثنائي للأعداد المفردة. وعلاوة على ذلـك لربمـا عرضـت لنـا رغبـة في تضمـين شـريط المدخلات كل أنواع الأوامر المعقدة إضافة إلى الأعداد . فلكي نتجاوز هذه الصعوبات، دعونـا نتبنى نهجاً سأدعوه **المختصر**، وهو يقوم على **عدم** قراءة أي متتاليـة عناصرهـا 0 و 1 (بحيـث لا يوجد سوى عدد محدود من الرمـز **1**) كأنهـا مجـرد عـدد ثنـائي ، و إنمـا نعيـد كتابتهـا (أو نقرؤها بالأحرى ذهنيا) في شكل متتالية ثانية من الأصفار "0" و الوحدان "**1**" والأثنينات "**2**" و الثلاثات "**3**" ... إلخ ، وذلك وفق قـاعدة تنـص علـى أن كـل رقـم مـن المتتاليـة الثانيـة هـو فحسب عدد الوحدان التي تفصل بين صفرين من المتتالية الأولى [و إذا لم يفصـل بـين صفريـن في الأولى أي شيء نكتب في الثانية 0] . نأخذ على سبيل المثال المتتالية (الأولى) :

0100010110101011010001110101011100110

فهذه المتتالية نستبدل بها المتتالية التالية (الثانية):

010 0 010110101011010 0 01110101011110 0110

| | | | | | | | | | | | | | | | |

1 0 0 1 2 1 1 2 1 0 0 3 1 1 4 0 2

وهكذا أصبح باستطاعتنا قراءة أعداد مثل 2 ، 3 ، 4 ، .... التي يمكـن أن تشـير إلى أوامـر من نوع ما. بالفعل، دعونا نعتبر 2 هي مجرد فاصلة تشير إلى المسافة بين عدديـن ، أمـا 3 ، 4 ، 5 ،... فيمكن أن تمثل، بحسب رغباتنا ، أوامر منوعه أو رموزاً مهمة ، مثـل " إشـارة نـاقص " أو " زائد " أو " ضرب " أو " اذهب إلى الموقع المرافق للعدد التالي " أو " كرر العملية السـابقة عددا مـن المـرات يسـاوي كـذا ! " وهكـذا يصبـح لدينـا الآن متتاليـة منوعـة مـن الأصفـار و الوحدان التي تفصل بينها أرقام أكبر ، وتخصص متتاليات الأصفار و الوحـدان لتمثيـل الأعـداد مكتوبة بالأساس الثنائي. فالتعاقب السابق سـيقرأ (مـع ملاحظـة أن "2" تشـير إلى فاصلـة لا غير):

... أمر رقم 3 العدد الثنائي فاصلة العدد الثنائي فاصلة العدد الثنائي

, 100 , 11 , 1001

فإذا استخدمنا الرموز العربية الشائعة 9,3,4,2,0 ،مكان الأعداد الثنائية 1001 ,11,100,10,0: بالترتيب: نحصل على التعاقب (مرتبا من اليسار إلى اليمين):

0, (أمر رقم 4) 3 (أمر رقم 3) 4،3،9

والجدير بالذكر أن هذا النهج يعطينا وسيلة لإنهاء التعبير عند عـدد معين بمجـرد استخدام الفاصلة في نهاية الأعداد (فنميزه بهذه الطريقة من الامتداد الأبيض اللانهائي لجهـة اليمـين مـن الشريط) . وهو يمكننا ، إضافة إلى ما سبق، من تدوين أي تعاقب منتـه مـن الأعـداد الطبيعيـة

بطريقة مختزلة ، وذلك بكتابته برموز النظام الثنائي المكونة من تعاقب واحد مكون من الأصفار والوحدان، وفيه نستخدم الفواصل للفصل بين الأعداد . ولكي نرى كيف يتم العمل بهذه الطريقة، دعونا نأخذ حالة خاصة . لنأخذ مثلاً الأعداد : ،4،1،1،0،13،5. فهي تكتب برموز النظام الثنائي، كما يلي:

101,1101,0,1,1,100,

وهذا ما يرمز على الشريط بطريقة التوسع (أي عكس نهج الاختصار السابق) على النحو التالي:

... 0000100101101010 010 11001101011010110100011 00 ...

ولكي نتوصل إلى هذا الترميز بطريقة بسيطة مباشرة ، يمكننا أن نقوم بالتعويض في متتالية الأعداد المعطاة (التي دوناها قبل قليل بالنظام الثنائي) على النحو التالي:

0 ⟶ 0

1 ⟶ 10

، ⟶ 110

وبعدئذ نضيف مزيدا غير محدد من الأصفار عند كلا الطرفين . ويمكننا أن نبين كيف تم تطبيق ذلك على الشريط السابق بطريقة أوضح ، إذا جعلناه متباعداً.

0000100101101010010110011010110101101000110000

سأسمي هذا التدوين (المكون من مجموعات من الأعداد) التدوين الثنائي الموسع (وهكذا فإن التدوين الثنائي الموسع للعدد 13 مثلا هو..... 1010010).

ثمة نقطة ختامية يجدر بنا ذكرها حول هذا الترميز.وهي نقطة تقنية ليس إلا و لكنها ضرورية لإتمام عملنا (3). ففي تمثيل الأعداد الطبيعية بالنظام الثنائي (أو العشري) يوجد فائض لا قيمة له من تلك الأصفار التي توضع على أقصى يسار العبارة الممثلة للعدد ، وليس له " اعتبار " ــ وهو يحذف عادة . بمعنى أن العدد 00110010 هو العدد الثنائي نفسه 110010 (وكذلك 0050 هو العدد العشري 50 نفسه) . ويمتد هذا الفائض حتى أنه يشمل الصفر نفسه ، فهو يمكن أن يكتب 000 أو 00 كما يمكن أن يكتب 0 لا غير . بالفعل، إنه لمن المنطقي أن يشير الفضاء الأبيض أيضا إلى الصفر ! ولكن هذا يؤدي في التدوين العادي إلى اختلاط الأمور. إلا أنه ينسجم خير انسجام مع التدوين الذي ذكرناه لتونا. وهكذا يمكن أيضاً أن نكتب الصفر الواقع بين فاصلتين على شكل فاصلتين إحداهما بعد الأخرى مباشرة(, ,) الأمر الذي يرمز له على الشريط على شكل زوجين من 11 يفصل بينهما 0 واحد (لأن الفاصلة الواحدة هي 110):

... 001101100 ...

وهكذا يمكن أن نكتب مجموعة الأعداد الستة السابقة 5،13،0،1،1،4 بتدوين ثنائي أيضا على النحو التالي

101,1101,,1,1,100 ,

ثم نرمزها على الشريط بصيغة ثنائية موسعة على النحو التالي:

... 00001001011010100101101101011010110100011000 ...

(هذه المتتالية تختلف عن سابقتها بأن فيها صفرا قد حذف من السابقة) .

والآن نستطيع اتخاذ آلة تورنغ لإنجاز خوارزمية إقليدس مثلاً، فنطبقها على زوج الأعداد المكتوبة بالتدوين الثنائي الموسع. فمثلاً، لإنجاز خوارزمية اقليدس في حال العددين 6 ، 8 اللذين سبق أن طبقنا هذه الخوارزمية عليهما، عندما كانا مدونين بالنظام الواحدي:

... 0000001111110111111100000 ...

نأخذ بدلاً منه التمثيل الثنائي لهذين العددين ، أي 110 و 1000 على الترتيب.

فالعددان : 8 و 6 هما بالتدوين الثنائي : 110 , 1000,

وهما بالتدوين الموسع ، يرمزان على الشريط كما يلي:

... 0000101001101000011000000 ...

ولكننا لم نوفر شيئاً بكتابة هذين العددين بالنظام الثنائي الموسع عن صيغة النظام الواحدي، ومع ذلك لنفرض أننا أخذنا على سبيل المثال العددين المكتوبين بالنظام العشري : 8610 و 1583169. إنهما يكتبان بالتدوين الثنائي كما يلي:

110000010100001000001 و 10000110100010

فهذان العددان يرمزان على الشريط كما يلي:

... 0101000000100100000100000010110100000101001000010011000 ...

وهكذا أتى تدوينهما هذا كله مناسبا لسطر واحد (أو لسطرين على الأكثر) . في حين أن الشريط الذي يمثل تدوينهما بالنظام الواحدي سيملأ أكثر مما يستوعبه هذا الكتاب بأكمله.

ويمكننا ، إذا شئنا، الحصول ببساطة على آلة تورنغ تنجز خوارزمية إقليدس حين يكون العددان معبراً عنهما بالتدوين الثنائي الموسع ، ولأجل ذلك نضيف إلى الخوارزمية **EUC** خوارزميتين جزئيتين مناسبتين تترجمان بين الواحدي و الثنائي الموسع. ولكن ذلك لن يكون في الواقع مجدياً أبداً ، لأن عدم جدوى نظام العد الواحدي سيظل قائماً " في داخله " وسيظهر ذلك جلياً في بطء الأداة و في طول "شريط المدخلات" (أو التخزين الخارجي) الذي سنحتاجه (والذي سيصبح كله على الجزء الأيسر من الشريط). وكان من الممكن أن نعرض آلة أكثر جدوى لخوارزمية إقليدس تعمل بأكملها ضمن النظام الثنائي الموسع ، ولكنها لن توضح لنا الأمور بصورة جلية .

ولكي نوضح بدلاً من ذلك كيف يمكن صنع آلة تورنغ تعمل على أعداد ثنائية موسعة، دعونا نجرب طريقة أبسط بكثير من خوارزمية إقليدس، ونعني بها الطريقة التي تقوم على مجرد جمع العدد 1 إلى عدد طبيعي. فهذه العملية يمكن أن تقوم بها آلة تورنغ (سأدعوها **XN + 1**) وهي تتضمن:

00→00R, 01→11R, 10→00R, 11→101R, 100→110L, 101→101R,
110→01STOP, 111→1000L, 1000→1011L, 1001→1001L, 1010→1100R,
1011→101R, 1101→1111R, 1110→111R, 1111→1110R.

وهنا أيضاً يمكن لبعض القراء المهتمين أن يحرصوا على التحقق بأن آلة تورنغ هذه تقوم فعلاً بما هو مفترض فيها أن تقوم به، وذلك بتطبيقه مثلا على العدد 167 الذي تمثيله بالنظام الثنائي هو 10100111 وهكذا سيعطى بالشريط:

... 0000100100010101011 0000 ...

ولكي نجمع 1 إلى عدد ثنائي نحدد مكان آخر صفر في العدد ونضع مكانه 1 , ثم نبدل الوحدات التي تليه بأصفار فمثلا العملية 168 = 1 + 167 تصبح بالتدوين الثنائي كما يلي:

10100111 + 1 = 10101000

وهكذا فإن عمل آلة تورنغ " جمع واحد " هو أن تضع مكان الشريط السابق الشريط:

... 0000010010010000110 0000 ...

الذي هو فعلاً مجموع العدد المعطى مع 1.

وهنا نلاحظ أن هذه العملية ، على بساطتها الكبيرة المقتصرة على جمع 1 ، هي بهذا التدوين ، معقدة بعض الشيء، وتستخدم خمسة عشر أمرا **وثماني** حالات داخلية مختلفة . في حين أن هذا الأمر كان ، كما هو واضح، أبسط بكثير، بالتدوين الواحدي، لأن " جمع واحد" يعني عندئذ مجرد تمديد متتالية الوحدان بزيادة 1 إليها. فلن يدهشنا أن آلتنا **UN + 1** (عدد واحدي + 1) كانت مبدئية أكثر. و على رغم ذلك ، ستكون هذه العملية في غاية البطء في حالة الأعداد الكبيرة، وذلك بسبب طول الشريط اللازم لها غير العادي ، فالآلة : **XN+1** (عدد ثنائي + 1) ، الأكثر تعقيدا ، التي تقوم بعملها على التدوين الثنائي الموسع الأقل طولاً، هي إذن أفضل من الآلة **UN+1** وسأشير إشارة جانبية إلى عملية تبدو فيها آلة تورنغ في التدوين الثنائي الموسع أبسط مما هي في حالة التدوين الواحدي و أعني بها عملية **الضرب بإثنين**. لأن آلة تورنغ **XN×2** التي تنجز عملية الضرب بـ 2 في التدوين الثنائي الموسع، هي:

00→00R, 01→10R, 10→01R, 11→100R, 100→111R, 110→01STOP,

في حين أن الآلة التي تنجز هذا الضرب في التدوين الواحدي أي **UN×2** التي سبق شرحها فيما سبق، هي أعقد من ذلك بكثير.

فهذه الأمثلة تعطينا فكرة بسيطة عما يمكن أن تفعله آلات تورنغ على المستوي الأولي جداً. ولكن يمكن لهذه الآلات أن تبلغ (بل هي تبلغ فعلا كما قد نتوقع) ، مستويات أعقد من ذلك بكثير حين يكون عليها أن تقوم بعمليات أعقد بعض الشيء من هذه . فيا ترى ما أقصى مدى لهذه الأدوات ؟ دعونا ننظر فيما يلي في هذه المسألة.

أطروحة تشيرش ـ تورنغ

حين يعتاد المرء على بناء آلات تورنغ بسيطة ، يصبح من السهل عليه أن يقنع نفسه بأن مختلف العمليات الحسابية الأساسية ، مثل جمع عددين أحدهما مع الآخر ، أو ضربهما ، أو رفع عدد إلى قوة عدد آخر ... يمكن، بالفعل، إنجازها كلها بآلات تورنغ خاصة بها. وشرح مثل هذه الآلات بالتفصيل ليس بالأمر المرهق جدا، ولكني لن أزعج نفسي بعمل ذلك هنا. حتى أنه من الممكن أن تقوم آلة تورنغ بعمليات تكون نتيجتها **زوجاً** من الأعداد الطبيعية، مثل القسمة مع باق ــ أو حتى يمكن أن تكون النتيجة هي مجموعة من الأعداد مهما بلغ عددها. وعلاوة على ما تقوم، يمكن بناء آلات تورنغ من دون أن نخصص مسبقا بالتحديد العملية التي يجب أن نقوم بها، ولكن الأوامر للقيام بهذا العمل تلقم وتسجل على الشريط. فلربما كانت العملية الخاصة التي يجب أن تقوم بها الآلة متوقفة، في مرحلة معينة، على نتيجة حساب يجب أن تقوم به الآلة في مرحلة سابقة للعملية (فمثلا: " إذا كان جواب هذا الحساب أكبر من العدد كذا ! فافعلي ذلك الشيء ، و إلا فافعلي ذاك ") . ويكفي في تقديرنا أن يتمكن المرء من بناء آلات تورنغ تقوم بعمليات حسابية أو منطقية بسيطة حتى يسهل عليه تصور كيف يمكن إنشاؤها لكي تنجز مهمات معقدة ذات طبيعة خوارزمية. فبعد أن يتسلى المرء بهذه الأشياء مدة من الزمن ، يتأكد بسهولة أنه يمكن بالفعل بناء آلة من هذا النوع لتقوم **بأي عملية آلية مهما كان نوعها !** وهكذا أصبح من المعقول رياضياً أن نعرّف العملية الآلية بأنها العملية التي تنفذها آلة من هذا النوع . كما أن الاسم "خوارزمية" و الصفات " حسوب " computable (أي قابل لأن يحسب) و " كرور " recursive (قابل لأن يتكرر) و " فعلي " effective يستعملها الرياضيون كلها للإشارة إلى عمليات آلية يمكن القيام بها بواسطة آلات نظرية من هذا النوع ــ أي بآلات تورنغ. ومن المعقول أن نعتقد أنه يمكن إيجاد آلة تورنغ تستطيع أن تقوم بأي إجراء كان، بشرط أن يكون واضحا و آليا بصورة كافية . فهذا في النهاية هو كل ما قصدناه من دراستنا التمهيدية (لآلة تورنغ) التي حرصت على إظهار مفهومها الحقيقي.

ومن جهة أخرى، قد لا يزال بعضنا يشعر بأنه ربما كان في تصميم هذه الآلات قصوراً غير ضروري، فقد يبدو لأول وهلة أن جعلها لا تقرأ في كل مرة سوى واحد من الأرقام الثنائية (0 أو 1) ولا تنتقل في كل مرة سوى خطوة واحدة وعلى طول شريط **واحد** ذي بعد

واحد، قد حدَّ من إمكانياتها. وقد نتساءل لماذا لا تقرأ أربعة أشرطة أو خمسة ، أو ربما ألفا منفصلة، بحيث تكون مجهزة بعدد كبير من وسائل القراءة المترابطة فيما بينها و التي تعمل كلها معا ؟. أو لماذا لا تقرأ مستويا كاملا من مربعات. (أو ربما مكعبات منضده في ثلاثة أبعاد) فيها أصفار " 0 "ووحدان "1" بدلا من الإلحاح على قراءة شريط ذي بعد واحد ؟ ولماذا لا نتيح لها أن تقرأ رموزاً أخرى، مأخوذة من نظام للعد أعقد من الثنائي، أو مأخوذة من أبجدية؟ في الحقيقة ما من واحد من هذه التغيرات يؤدي إلى أدنى اختلاف فيما يمكن إنجازه مبدئياً. هذا على الرغم من أن بعضها يؤدي إلى شيء من الاختلاف في توفير العمليا ت (كما سيكون الحال حتما إذا جعلناها تقرأ أكثر من شريط واحد) . فصنف العمليات المنجزة ، و التي تأتي بالتالي تحت عنوان : "خوارزميات " (أو " حسوبات "، أو " إجراءات فعلية " أو " عمليات يمكن تكرارها ") ستكون بالتحديد هي نفسها كما كانت من قبل حتى لو وسعنا تعريف آلاتنا بجميع هذه الطرق مرة واحدة!

وليس صعبا علينا أن نلاحظ أننا لسنا **بحاجة** لأكثر من شريط طالما أن أداتنا تستطيع أن تجد فيه دائما متسعاً على قدر ما يلزم. ولتحقيق ذلك، قد تحتاج لأن تحول باستمرار بعض المعطيات من مكان على الشريط إلى آخر. وقد يكون ذلك غير مجد ، ولكنه لا يحد مما يمكن إنجازه مبدئيا (4) . وبالمثل فإن استعمال أكثر من آلة تورنغ واحدة **تعمل بالتوازي** مع الأولى ـ وهي فكرة أصبحت في السنوات الأخيرة فاتنة ، ولها صلة بمحاولات وضع نموذج أقرب إلى عقل الإنسان ـ هي أيضا فكرة *لن* تربح مبدئياً أي شيء (على الرغم من أنه قد يكون هناك بعض التحسين في سرعة العمل ضمن بعض الظروف). و كذلك إذا كان لدينا أداتان منفصلتان و لا تتصل إحداهما بالأخرى مباشرة ، فإنهما لن تنجزا أكثر مما تنجزانه إذا كانتا على صلة فيما بينهما لأنهما إذا كانتا على صلة، فهما في الحقيقة أداة واحدة لا غير !

وماذا بشأن اقتصار تورنغ على شريط ذي بعد واحد ؟ فلو كنا نتصور أن هذا الشريط يمثل " الوسط " لفضلنا، ربما، تصوره سطحا مستويا بدلا من شريط ذي بعد واحد ، أو ربما فضاء ذا ثلاثة أبعاد . فقد يبدو السطح المستوي بالنسبة " للوحة الإجراءات" (كما في الوصف السابق لخوارزمية إقليدس) أقرب لأن يلبي حاجاتنا من شريط ذي بعد واحد*. ومع

---

* ستكون لوحة الإجراءات هذه نفسها ، بحسب شرحنا هذا للموضوع ، جزءا من الأداة بدلا من أن تكون جزءاً من شريط الوسط الخارجي. فقد كانت هذه اللوحة هي الأعداد الفعلية A، B ، A-B ... إلخ ، التي مثلناها على الشريط . ومع ذلك سنحتاج أيضاً للتعبير عن مواصفات الأداة بصيغة خطية وحيدة البعد . وسنرى فيما بعد ، فيما يتصل بآلة تورنغ العامة ، أنه توجد صلة حميمة بين مواصفات "أداة " خاصة و " ومعطيات " أو (برنامج) المواصفات الممكنة المخصصة لأداة معينة. لذلك من المناسب أن يكون لدينا كلا الشيئين بصيغة بعد واحد.

ذلك، لا توجد، مبدئياً، صعوبة في تدوين مخطط الإجراءات بصيغـــة البعـــد الواحـد (فنستخدم مثلاً، الوصف الكلامي العادي للوحة). إن عرض الرموز في مستو ثنائي الأبعاد، مناسب لنا نحن فقط، ويسهل علينا استيعابه، ولكن هذا لا يضيف شيئا لما يمكن، مبدئياً، أن ينجز فيه. ومن الممكن دائما وضع رمز في خط مستقيم على شريط ذي بعد واحد ليدل على موضع إشارة أو شيء موجود في مستو ذي بعدين، أو حتى في فضاء ذي ثلاثة أبعاد. (والحقيقة أن استخدام مستو ذي بعدين يكافيء تماماً استخدام شريطين. فهذان الشريطان يعطياننا "الإحداثيين" اللذين نحتاجهما لتحديد موضع نقطة في المستوي ذي البعدين، ويمكن كذلك **لثلاثة** أشرطة أن تقوم بدور " إحداثيات " نقطة في فضاء ذي ثلاثة أبعاد). وها أنا أكرر القول، قد يكون هذا الترميز في بعد واحد غير فعال ولكنه لا يحد مبدئياً مما يمكن إنجازه.

وعلى الرغم من كل ذلك لازلنا نستطيع أن نتساءل: هل يشمل مفهوم آلة تورنغ **حقاً كل عملية** منطقية أو رياضية نرغب في وصفها بأنها "آلية"؟ هذا سؤال لم تكن المواقف منه واضحة في الوقت الذي دون فيه تورنغ بحثه الأساسي، مثلما هي اليوم. لذلك رأى تورنغ أن من الضروري إعلان قضيته بتفصيل رائع . وقد لقيت قضية تورنغ التي نوقشت بإحكام ، دعماً إضافياً من أعمال المنطقي الأميركي ألونزو تشيرش **Alonzo Church** الذي كان قد طرح بصوررة مستقلة (وبمساعدة من كلين**S.C. Kleene** ، وقبل تورنغ نفسه) مشروعاً ــ هو الحساب اللمبدائي ــ الذي كان هدفه حل مسألة هلبرت التي سبق ذكرها. وعلى الرغم من أن هذا المشروع ، الذي كان آلياً وشاملاً كل الشمول ، كان أقل وضوحاً بكثير من مشروع تورنغ ، فقد كان يتميز عنه بإيجاز بنيته الرياضية المدهش (وسأشرح في نهاية هذا الفصل حساب تشير ش الرائع). وكانت هناك أيضاً، وبمعزل عن تورنغ، مقترحات أخرى لحل مسألة هلبرت (**أنظر1988 Gandy**). ولا سيما اقتراح المنطقي البولوني ــ الأميركي إميل بوست Emil Post (فقد ظهر بعد تورنغ بقليل ، ولكن فكرته كانت أقرب إلى فكرة تورنغ منها إلى فكرة تشيرش). ثم سرعان ما تبين أن هذه المشاريع كلها متكافئة تكافؤا تاماً . مما أضاف دعما كبيرا جدا لوجهة النظر التي أصبحت تعرف باسم ***أطروحة تشيرش ــ تورنغ*** القائلة إن مفهوم آلة تورنغ (***أو مكافئتها***)، تعرِّف في الحقيقة ماذا نعنيه، من الوجهة الرياضية، بقولنا ***نهج خوارزمي (أو فعلي ، أو كرور ، أو آلي)*** . ولكن الذين يشعرون اليوم كما يبدو، بالحاجة للسؤال عن تلك الأطروحة في صيغتها الأصلية، ليسوا كثيرين بعد أن أصبحت تلك الحواسيب العالية السرعة جزءا مألوفا من حياتنا . وإنما وجه بدلا من ذلك شيء من الانتباه إلى السؤال : هل المنظومات الفيزيائية الفعلية (وبينها فرضا دماغ الإنسان) ــ أي الأشياء التي تخضع لقوانين **فيزيائية** دقيقة ــ يمكنها أن تقوم بالعمليات المنطقية و الرياضية نفسها التي تقوم بها آلة تورنغ أو بأقل أو أكثر منها . فأنا من جهتي سعيد جداً بقبول أطروحة تشيرش ــ تورنغ بصيغتها **الرياضية** الأصلية. أما ما هي صلتها بسلوك المنظومات الفيزيائية

الراهنة فهي من جهة أخرى قضية منفصلة عن السابقة و ستكون في النهاية شاغلنا الرئيسي في هذا الكتاب.

أعداد أخرى غير الأعداد الطبيعية

لم نتاول في دراستنا السابقة سوى عمليات على **الأعداد الطبيعية**، و أشرنا عندئذ إلى الحقيقة الهامة، و هي أن بإمكان آلات تورنغ المفردة أن تعالج أعدادا طبيعية مهما كان قدرها، هذا على الرغم من أن كل آلة منها ليس لها سوى عدد منته محدد من الحالات الداخلية. ولكننا غالبا ما نكون بحاجة للتعامل مع أنواع من الأعداد أعقد من تلك، مثل الأعداد السالبة والكسرية و العشرية غير المنتهية . أما الأعداد الكسرية السالبة (مثل العدد 297/2 ــ) فيمكن معالجته بسهولة بآلات تورنغ ، كما يمكن للبسط و المقام أن يكونا كبيرين قدرما نريد . وكل ما نحتاج إليه هو رمزان مناسبان للإشارة " ــ " و إشارة الكسر " / " وهذا ما يمكن تحقيقه بسهولة باستخدام التدوين الثنائي الموسع الذي سبق شرحه (فنصطلح مثلا أن " 3 " رمز الإشارة " ــ " ؛ و "4" رمز الإشارة " / " وتدونان على الشريط على الترتيب 1110 و 11110 بالتدوين الثنائي [†] الموسع) . وتعالج الأعداد السالبة و الكسرية معبراً عنها بدلالة مجموعات منتهية من الأعداد الطبيعية ، فهذه الأعداد لن تفيدنا بجديد بالنسبة لمسألة قابلية الحساب العامة.

وكذلك لن نتعلم في حالة الكسور العشرية **المنتهية**، مهما كان طولها ، أي جديد ، لأن هذه الأعداد هي حالة خاصة لا غير من الأعداد الكسرية . فالقيمة التقريبية العشرية مثلا للعدد الأصم π المعطاة كما يلي: 3.14159265 هي الكسر 314159265/100000000. على أن العبارات العشرية غير المنتهية مثل المنشور الكامل للعدد:

$$\pi = 3.141592658979 \ \ldots$$

تعرضنا لبعض الصعوبات. فلا مدخلات آلة تورنغ ولا مخرجاتها يمكن أن تكون، بكل معنى الكلمة، كسراً عشرياً غير منته. فقد نظن أن باستطاعتنا إيجاد آلة تورنغ يمكنها أن تظهر على شريط المخرجات **جميع** الأرقام المتتالية ......,3,1,4,1,5,9: في منشور π المبين أعلاه و أن كل ما علينا هو أن نترك الآلة تعمل إلى الأبد . ولكن هذا الأمر **غير متاح** لآلة تورنغ. لأنها لن تتوقف (معلنة عن ذلك بقرع الجرس) لذلك لن يحق لنا فحص مخرجاتها. وهذا أمر يجب أن نتوقعه منها. فالمخرجات تظل عرضة لإمكانية التغيير طالما أن الآلة لم تصل بعد إلى أمرالتوقف STOP ، فلا نستطيع إذن أن نثق بعد بمخرجاتها . أما بعد أن تصل إلى أمر بالتوقفSTOP ، تكون المخرجات منتهية حتماً .

[†] إن التدوين الثنائي الموسع، بحسب المصطلحات السابقة تدون فيه الرموز على الشريط بالنظام الواحدي، والأعداد بالنظام الثنائي مع وضع الأصفار الزائدة لضرورة تمييزها من الأولى

ولكن هناك طريقة لجعل آلة تورنغ تنتج **بحق** أرقاماً، واحداً تلو الأخر، بطريقة شبيهة جداً بهذه. فإذا أردنا أن نولد منشور عدد عشري غير منته. وليكن π ، نستطيع أن ننشىء آلة تورنغ تنتج القسم الصّحيح 3 من العدد π بجعلها تؤثر في 0، ثم يمكننا أن ننتج أول رقم عشري 1 بجعل الآلة تؤثر في 1، ثم تنتج الرقم العشري الثاني 4 بجعلها تؤثر في 2، ثم الثالث1 بجعلها تؤثر في 3 وهكذا دواليك[x]. و الحقيقة أن وجود آلة تورنغ لتوليد منشور π العشري بأكمله هو، ***بهذا*** المعنى، ***وجود مؤكد***، على الرغم من أن طريقة إنشائها بصورة صريحة، أعقد من سابقتها بقليل. وهذا القول ينطبق على كثير من الأعداد الصماء الأخرى مثل :

$$\sqrt{2} = 1.414213562 \ldots$$

ومع ذلك فقد تبين أن هناك أعداداً صماء لا يمكن (ويا للغرابة)توليدها بأي آلة تورنغ على الإطلاق، وهذا ما سنراه في الفصل القادم . أما الأعداد التي ***يمكن*** توليدها (أي يمكن حسابها) بهذه الطريقة فتدعى ***حسوبة*** computable (Turing 1937) . والأعــداد التي لا يمكن أن تحسب (وهي في الحقيقة الأغلبية العظمى) تسمى ***لاحسوبة***. وسأعود إلى هذه المسألة و إلى قضايا مرتبطة بها في فصول قادمة ، إذ سيكون لها بالنسبة لنا صلة وثيقة بمسألة ***الأشياء الفيزيائية الفعلية*** (مثل دماغ الإنسان) وهل من الممكن وصفها وصفاً كافياً، بحسب نظرياتنا الفيزيائية ، بدلالة بنى رياضية حسوبة .

إن قضية الحسوبية قضية مهمة في الرياضيات بوجه عام . ويجب ألا يظنها المرء مجرد مسألة لا تنطبق إلا على الأعداد كأعداد ، بل يمكن أن يكون لديه آلات تورنغ تقوم بعملها على **الدساتير الرياضية** مباشرة، مثل العبارات الجبرية و المثلثاتية، أو تقوم بالمعالجات الشكلية للحساب المتناهي في الصغر. وكل ما يحتاجه المرء عندئذ هو صيغة بالترميز الدقيق موضوعة في شكل متتاليات من الأصفار و الوحدان ، لجميع الرموز الرياضية المتضمنة في العملية. وعندئذ يمكن لمفهوم آلة تورنغ أن يطبق . أو هذا ، على كل حال ، ما كان يدور في ذهن تورنغ في تصديه لمسألة هلبرت العاشرة، التي سبق ذكرها **Entscheidungsproblem** و التي تبحث عن نهج خوارزمي يجيب عن أسئلة رياضية ذات **طبيعة عامة**. وهذا ما سنعود إليه عما قريب.

آلة تورنغ العامة

لم أشرح حتى الآن مفهوم آلة تورنغ العامة universal . الحقيقة أنه ليس من الصعب إعطاء المبدأ الذي تقوم عليه، على الرغم من أن التفاصيل فيها معقدة . فالفكرة الأساسية فيها هي أن نرمِّز قائمة الأوامر التي ستعطى لآلة تورنغ العادية T في شكل متتالية من الأصفار و الوحدان يمكن تمثيلها على شريط. ثم يحمل هذا الشريط ليكون الجزء الابتدائي من المدخلات المعدة لآلة تورنغ من نوع خاص U ـ التي تسمى عندئذ آلة تورنغ عامة. وعندئذ تقوم هذه بعملها على ما

---

[x] لأن هذه الأرقام هي دالة منطلقها الأعداد الصحيحة 3,2,1,0 ....

تبقى من المدخلات وكأن T هي التي كانت ستعمل بالتحديد. فآلة تورنغ العامة هي إذن آلة تقليد شامل . إذ إن الجزء الابتدائي من الشريط يعطي لآلة تورنغ العامة U كل المعلومات التي تحتاجها لكي تقلد بدقة أي آلة من الآلات T مهما كانت.

ولكي نرى كيف تعمل هذه الآلة، نحتاج أولا إلى طريقة منهجية **لترقيم** آلات تورنغ . فلنأخذ قائمة الأوامر التي تعرِّف آلة معينة من آلات تورنغ ، و لتكن مثلا إحدى الآلات التي وصفناها سابقاً. علينا الآن أن نرمز هذه القائمة في شكل متتالية من الأصفار و الوحدان و فقا لمخطط دقيق واضح. وهذا ما يمكن إنجازه بمساعدة النهج" المختصر " الذي تبنيناه سابقاً. لأننا إذا مثلنا الرموز التالية R و L و STOP و السهم (⟵) و الفاصلة، بالترتيب ، بالأعداد 2 ، 3 ، 4 ، 5 ، 6 مثلاً، نستطيع أن نرمز إليها (على الشريط) بطريقة مختصرة، بـ 110 ، 1110، 11110 ، 111110 ، 1111110 ، وعندئذ يصبح رمزا الرقمين 0 و 1 هما على الترتيب 0 و 10 ، ويمكن استخدامهما إذن للمتتاليات الراهنة المكونة من هذه الرموز التي تظهر في اللوحة. كما لن نحتاج لتدوينين مختلفين لكي نميز الشكلين الكبيرين في لوحة آلة تورنغ من الصورتين القائمتين الصغيرتين للرقمين 0 و 1 نفسيهما لأن وضع الأشكال الكبيرة للأرقام في نهاية التعداد الثنائي يكفي لتمييزها من الأشكال الكبيرة الأخرى . وهكذا سيقرأ 1101 مثلاً مثلما يقرأ 1101 ويرمز على الشريط كما يلي 1010010 ، ونخص بالذكر 00 سيقرأ كما يقرأ 00 الذي يمكن أن يرمز له على الشريط بـ 0 من غير التباس. أو مثل رمز محذوف كلياً. كما نستطيع أن نوفر جهداً كبيراً إذا لم نزعج أنفسنا بترقيم أي سهم أو أي واحد من الرموز السابقة له مباشرة، معتمدين بدلاً من ذلك على الترتيب العددي للأوامر لكي نحدد ما الذي يجب أن تكونه هذه الرموز ـ ومع ذلك، ولكي نتبنى هذا النهج ، يجب أن نتأكد أنه لا وجود في هذا الترتيب لثغرات ، عدا عما يمكن أن ندخله من أوامر "كاذبة " إضافية في المكان المطلوبة فيه (مثلاً : في آلة تورنغ **"XN+1"** (أي : عدد طبيعي + 1) لا يوجد أمر يعلمنا ماذا نفعل في حالة 11o0، لأن هذا التركيب لا يرد أبدا في سير الآلة، لذلك يجب أن نقحم أمراً " كاذباً ": وليكن الأمر 11oO ⟵ o0R الذي يمكن أن يوضع ضمن القائمة من دون أن يغير أي شيء . كما يجب أن نقحم في الآلة **"XNx2"** (عدد طبيعي × 2) الأمر **101 ⟵ o0R** إذ إن ترميز الأوامر اللاحقة في القائمة سيفسد من دون هذه الأوامر "الكاذبة" وكذلك لسنا بحاجة في واقع الأمر للفاصلة في نهاية كل أمر، لأن الرموز L أو R تكفي للفصل بين الأوامر . لذلك يكفي أن نتبنى الترميز التالي:

0 يدل على o أو0 ؛ 10 يدل على 1 أو 1 ، 110 يدل على R ؛ 1110 يدل على L ، 11110 يدل علىSTOP وعلى سبيل المثال، دعونا نرمِّز آلة تورنغ "عدد طبيعي + 1 " **XN+1** (مع اقحام الأمر 110O ⟵ o0R) فإذا أهملنا الأسهم و الأرقام التي قبلها مباشرة و الفواصل أيضا . تصبح أوامر هذه الحالة:

0OR 11R 0OR 101R 11OL 101R 01STOP 100OL 1011L 1001L
110OR 101R 0OR 1111R 111R 111OR.

ونستطيع أن نحسن هذه بإهمال كل o0 وتبديل كل o1 بـ 1 فقط ، وذلك وفقا لما سبق أن قلناه سابقاً، فنحصل على:

R11RR101R11OL101R1STOP100OL1011L1001L110OR101RR1111R111R111OR.

وهذا ما نرمزه على الشريط وفق التعاقب التالي:

110101011011010010110101001110100101101011110100001110
100101011101000101110101000110100101101101010101011010
10101101010100110.

ونستطيع دائما كذلك، بهدف كسب القليل من التوفير الإضافي، حذف البداية 110 (ومعها الامتداد اللانهائي المكون للقسم الأبيض من الشريط الذي يسبق هذه البداية) لأنها تشير إلى الرمز o0R الذي يمثل أول أمر ، أي o0R ⟵ o0 الذي كنت قد اتخذته ضمناً بداية مشتركة **لجميع** آلات تورنغ ــ وهكذا يمكن للأداة أن تبدأ بعيدا أينما كان على يسار العلامات الموجودة على الشريط، ثم تسير نحو اليمين إلى أن تصل إلى أول علامة ــــ ونستطيع دائماً كذلك شطب النهاية 110 (ومعها متتالية الأصفار الضمنية التي يفترض أنها تليها) لأن آلات تورنغ كلها يجب أن تنهي تعليماتها بهذه الطريقة (فهي كلها تنتهي بـ R أو L أو STOP)[x] وهذان الاختصاران هما الأخيران . فالعدد الثنائي الناتج أخيراً هو **رقم** آلة تورنغ ، فهذا الرقم في حالة "**XN+1**" هو:

1010110110100101101010011101001011010111101000011101001
010111010001011101010001101001011011010101010110101010
01101010100.

وهذا العدد هو بالتدوين العشري الشائع:

450813704461563958982113775643437908

ونسمي أحياناً آلة تورنغ التي عددها n تسمية مبهمة إلى حد ما، هي آلة تورنغ النونية ونشير إليها بالرمز. T_n وعلى هذا النحو، تكون الآلة **XN+1** " عدد طبيعي + 1 " هي آلة تورنغ التي ترتيبها العدد العشري السابق.!

و إنه لمن المدهش أن يكون علينا المضي بعيدا في " لائحة " آلات تورنغ قبل أن نصل إلى تلك التي تقوم بعملية ، حتى و لو كانت تافهة كهذه " جمع واحد إلى عدد طبيعي "

---

[x] فإذا لم نجد في أقصى اليمين أي أمر فهذا يعني R و إذا وجدنا 1 فهذا يعني L لأن رمزها 1110 وإذا وجدنا 11 فهذا يعني STOP لأن رمزها 11110.

(بالتدوين الثنائي الموسع)، (ولا أعتقد **بأني كنت بالإجمال مقصراً** في ترميزي ، على الرغم من أنـي أرى مجالاً لبعض التحسينات الصغيرة). في الواقع ، توجد آلات تورنغ مهمة و أرقامها صغيرة منها **UN+1** (عدد واحدي + 1) ورقمها الثنائي.

101011010111101010

وهذا الرقم يساوي في التدوين العشري (العدد الصغير نسبياً) 177642. من ذلك يتضح أن آلة تورنغ الخاصة بالعملية التافهة جدا **UN + 1** التي تقتصر على إضافة 1 إلى أحد طرفي تعاقب الوحدان ، هي الآلة التي رقمها 177642 ويمكن أن نشير هنا من قبيل إرضاء الفضول إلى أن " الضرب باثنين " في كلا التدوينين يأتي في مكان وسط بين هاتين الآلتين السابقتين في لائحة آلات تورنغ ، إذ نجد أن رقم"**XN×2**"هو 10389728107 في حين أن رقم " **UN×2** " هو:

1.492.923.420.919.872026.917.547.699

قد لا يدهشنا أن نعرف، نظراً لضخامة هذه الأعداد، بأن الغالبية العظمى من الأعداد الطبيعية تكون أرقاما لآلات تورنغ عامة غير نافعة. و لنجرب أن ندرج آلات تورنغ الثلاث عشرة الأولى وفقا لهذا الترقيم:

T_0:	00→00R,	01→00R.	
T_1:	00→00R,	01→00L.	
T_2:	00→00R,	01→01R.	
T_3:	00→00R,	01→00STOP.	
T_4:	00→00R,	01→10R.	
T_5:	00→00R,	01→01L.	
T_6:	00→00R,	01→00R,	10→00R.
T_7:	00→00R,	01→???,	
T_8:	00→00R,	01→100R.	
T_9:	00→00R,	01→10L.	
T_{10}:	00→00R,	01→11R.	
T_{11}:	00→00R,	01→01STOP.	
T_{12}:	00→00R,	01→00R,	10→00R.

من هذه الآلات، هناك To تمسح كل شيء تصادفه في حركتها الدائمة نحو اليمين ، فلا تتوقف و لا تعود إلى الخلف . والآلة T_1 تقوم بالعمل نفسه ، ولكن بطريقة خرقاء ، إذ تهتز إلى الخلف بعد مسح كل إشارة على الشريط . و الآلة T_2 مثل الآلة To تتحرك بلا نهاية نحو اليمين ، ولكن بوقار أكثر ، إنها ببساطة تدع كل شيء على الشريط كما كان . وما من

واحدة من هذه الآلات فيها أي نفع ، لأنها كلها لا تتوقف . أما T_3 فهي أول آلة محترمة، فهي تتوقف فعلا و بتواضع بعد أن تغير أول *1* (في أقصى اليسار) إلى *O*.

وتواجه T_4 مشكلة جدية، فبعد أن تلتقي بأول *1* على الشريط، تدخل في حالة داخلية لا يوجد بالنسبة لها لائحة تدرج عليها . وهكذا لا وجود لأوامر بما ستفعله بعد ذلك. وتواجه T_8 وT_9 و T_{10} المصير نفسه. والمشكلة أكثر تأصلاً أيضاً مع. T_7 إذ إن متتالية الأصفار و الآحاد التي نرمِّزها تتضمن تعاقباً يتكون من 1 مكرراً 5 مرات 110111110 : وهذا التعاقب ليس له تأويل . فحالما تصادف T_7 أول *1* على الشريط تتلقى طعنة (سأقول عنT_7 و عن كل آلة أخرى T_n يحتوي عندها التدوين الثنائي الموسع للعدد n تعاقب الرمز 1 أكثر من 4 مرات إنها **مخصصة تخصيصا غير صحيح**) . و تلاقي الآلات T_5 و T_6 و T_{12} مشاكل مماثلة لتلك التي تلاقيها T_0 و T_1 وT_2، إنها ببساطة تظل تعمل إلى الأبد من دون توقف أبداً. إن الآلات المذكورة في اللائحة كلها ماعد T_3 و T_{11} باطلة (أي عديمة النفع)! أما T_3 وT_{11} فتعملان، ولكن عملهما ليس له أهمية، حتى أن T_{11} أكثر تواضعاً من T_3، إنها تتوقف عند أول 1 تصادفه ولا تغير أي شيء!

لابد أننا سنلاحظ فائضاً في لائحتنا. فالآلة T_{12} مطابقة للآلة T_6 ومطابقة كذلك في عملها لـ T_1 لأن الحالة الداخلية 1 في الآلتين T_6 و T_{12} لا دخل لها أبداً. ولا حاجة لأن يربكنا هذا الفائض أو كثرة الالات العديمة القيمة في اللائحة. ثم إن التحسين وإن كان ممكناً فعلاً في هذا الترميز، كإلغاء الكثير من الآلات الباطلة والتخلص من كثير من الآلات الفائضة، إلا أن هذا التحسين كله سيقابله مزيد من التعقيد في آلتنا العامة «المسكينة» التي عليها أن تفك الرموز وأن تزعم بأنها آلة توزنغ عامة T_n هي بصدد قراءة رقمها n. وقد كان يجدر بنا القيام بهذا التحسين لو كان بإمكاننا الخلاص من جميع الآلات الباطلة (أو الفائضة). ولكن هذا غير ممكن كما سنرى عما قريب! لذلك دعونا نترك ترميزنا على ما هو عليه.

وسيكون من الأنسب لنا أن نفسر شريطاً ما مع علاماته المتتالية، مثل:

...0001101110010000...

بانه تمثيل ثنائي لعدد معين. ولنذكر أن الأصفار تتالى إلى اللانهاية في كلا الطرفين، ولكن لا يوجد سوى عدد منته من الوحدان. كما أني أفترض أن عدد الوحدان ***ليس صفراً*** (أعني أنه يوجد الرقم 1 مرة واحدة على الأقل) فنستطيع أن نختار قراءة متتالية الرموز المنتهية المحصورة بين أول 1 وآخر 1 (بما فيها الأول والأخير). فهذا العدد في الحالة السابقة هو:

110111001

بحسب التدوين الثنائي لعدد طبيعي (وهو في التدوين العشري 441). على أن هذه الطريقة لـن تعطينا سوى أعداد *فردية* (أي أعداد ينتهي تمثيلها الثنائي بـ 1) بينما نود أن نتمكـن مـن تمثيـل **جميع** الأعداد الطبيعية. لذلك نتبنى أبسط وسيلة وهي حذف الواحد الأخير (الذي نعتـبره مجـرد مؤشر لانتهاء العبارة) ثم نقرأ ما كان على يساره كمـا نقـرأ أي عـدد ثـنائي [5]. ففـي المثـال السابق يصبح لدينا العدد الثنائي:

...11011100...

وهذا العدد بالتدوين العشري هو 220. كما يجب أن نلاحظ أن هذا الإجراء يمتاز بأن العـدد 0 يمثل أيضاً بشريط عليه علامة، أي بمتتالية من الشكل

0000001000000

دعونا ننظر الآن فيما تفعله آلة تورنغ T_n في متتالية ما (منتهيـة) مكونـة مـن أصفـار ووحـدان مسجلة على شريط نلقمه للآلة من اليمين. وهنا من المناسب لنا أن نقرأ هذه المتتالية كأنها تمثل عدداً ثنائياً وليكن m وفقاً للخطة المبينة أعلاه. ثـم دعونـا نفـرض أن الآلـة T_n توقفـت أخـيراً (عند الأمر STOP) بعد عدة خطوات متتالية. عندئذ تكون متتالية الأرقام الثنائية الـتي أنتجتهـا الآلة على اليسار هي جواب الحساب. فدعونا نقرأ هذا الجواب كأنه يمثل بالطريقة نفسها عدداً ثنائياً وليكن P، وهكذا نستطيع أن نقول إنه: عندما تقو0م آلة تورنغ T_n بعملها على m تنتج P ونكتب ذلك كما يلي :

$$T_n(\ m) = P$$

والآن دعونا ننظر إلى هذه العلاقة نظرة تختلف بعـض الاختـلاف. فنتصـور أنهـا تعبر عـن عملية واحدة مستقلة تطبق على العددين n و m فتنتج P (وهكـذا : إذا اعطينـا العدديـن n و m استطعنا أن نستنتج منهما مـا هـي P بـالنظر فيمـا تفعلـه آلـة تورنـغ T_n في m). إن هـذه العملية المستقلة هي إجراء خوارزمي بكل معنى الكلمة. فيمكن أن تنفذه إذن آلة تورنغ ***معينـة*** واحدة ولتكن U. بمعنى أن U تقوم بعملها على الثنائية (n,m) لكي تنتج P . ولما كانت الآلـة U عليها أن تقوم بعملها على n و m كليهما لكي تنتج نتيجة واحدة P ، فنحن بحاجة لطريقـة معينة لكي نرمزّ الثنائية (n, m) على شريط ***واحد***. ولكي نقوم بذلك نستطيع أن نفترض أن n تكتب بتدوين ثنائي عادي وتختتم عندئذ مباشرة بالتتالي 111110 . (وهنا نذكر أن كل آلة من آلات تورنغ المختصة فعلاً يكون عددها الثنائي هو تعاقب مكون فحسب مـن 0و 10 و110 و 1110 و 11110 فهو لذلك لا يحوي أي تعاقب يتكرر فيه الواحد أكثر من أربع مرات. لذلـك فإذا كانت T_n هي بحق آلة متخصصة، فإن ظهور المتتالية 111110 يعني فعلاً إنهاء عبارة العدد n). وكل شيء يليها هو فقط الشريط الذي تمثله m وفقـاً للتعليمـات السـابقة (وأعـني بذلـك

العدد الثنائي m ويليه مباشرة ....1000.) فهذا القسم الثاني هو ببساطة الشريط الذي تقوم الآلة T_n بعملها عليه.

ولنأخذ مثالاً على ذلك: إذا كانت n=11 و m=6 كان الشريط الذي ستعمل عليه الآلة U عملها هو التعاقب:

...0000101111110110100000....

فهذا الشريط (بدءاً من اليسار) يتألف من :

0000 (الشريط الأبيض الابتدائي)

1011 (التمثيل الثنائي للعدد 11)

111110 (انتهاء n)

110 (التمثيل الثنائي للعدد 6)

...10000 (باقي الشريط).

إن ما يترتب على آلة تورنغ U أن تقوم به في كل خطوة تالية تخطوها T_n في عملها على m هو أن تفحص بنية متتالية الأرقام في التدوين المعبر عن n وذلك لكي يتم التبديل المناسب في أرقام m (أعني شريط T_n). وفي واقع الأمر، ليس من الصعب مبدئياً أن نرى كيف يمكن بناء آلة كهذه (وإن يكن مجهداً حتماً في التطبيق). كل ما في الأمر أن لائحة أوامرها الخاصة[x] تزودنا ببساطة، في كل مرحلة من مراحل تطبيقها على أرقام الشريط التي هي أرقام العدد m، بوسيلة لقراءة المدخل المناسب من هذه اللائحة المرمزة بالعدد n، ولا سبيل طبعاً لإنكار أن الآلة ستراوح كثيراً في ذهابها وإيابها بين أرقام العدد m وأرقام العدد n وستسير العملية كلها ببطء مفرط. ومع ذلك، يمكننا حتماً الحصول على لائحة أوامر لهذه الالة، وسنقول عن هذه الآلة أنها آلة تورنغ ***عامة***، ونشير إلى العمل الذي تقوم به هذه الآلة على ثنائية الأعداد n و m بالرمز U(n , m). فلدينا إذن عند كل ثنائية (n,m):

$$U(n,m) = T_n(m)$$

بشرط أن تكون T_n عندئذ آلة من آلات تورنغ المختصة فعلاً (بعمل مفيد) (6) فالآلة U، حين تلقم أولاً بالعدد n، تقلد عندئذ بكل دقة آلة تورنغ التي ترتيبها n،

ولما كانت U آلة من آلات تورنغ فهي نفسها لها رقم u أي أن:

$$U = T_u$$

فيا ترى كم هو كبير هذا العدد u ؟ في واقع الأمر، يمكن أن نأخذ u ***بالتحديد:***

---

[x] أي الأوامر الخاصة بـ U وهي الأوامر التي تجعل U تقرأ أوامر T المرمزة بالعدد n ثم تقلدها.

u = 7244855335339317577198395039615711237952360672556559631108144796606505059404241090310483613632359365644443458382226883278767626556144692814117715017842551707554085657689753346356942478488597046934725739988582283827795294683460521061169835945938791885546326440925525505820555989451890716537414896033096753020431553625034984529832320651583047664142130708819329717234151056980262734686429921838172157333482823073453713421475059740345184372359593090640024321077342178851492760797597634415123079586396354492269159479654614711345700145048167337562172573464522731054482980784965126988788964569760906634204477989021914437932830019493570963921703904833270882596201301773727202718625919914428275437422351355675134084222299889374410534305471044368695876405178128019437530813870639942772823156425289237514565443899052780793241144826142357286193118332610656122755531810207511085337633806031082361675045635852164214869542347187426437544428790062485827091240422076538754264454133451748566291574299909502623009733738137724162172747723610206786854002893566085696822620141982486216989026091309402985706001743006700868967590344734174127874255812015493663938996905817738591654055356704092821332221631410978710814599786695997045096818419062994436560151454904880922084480034822492077304030431884298993931352668823496621019471619107014619685231928474820344958977095535611070275817487333272966789987984732840981907648512726310017401667873634776058572450369644348979920344899974556624029374876688397514044516657077500605138839916688140725455446652220507242623923792115253181625125363050931728631422004064571305275802307665183351995689139748137504926429605010013651980186945639498

(أو أي عدد ممكن آخر يكون بهذا القدر على الأقل). لا شك أن هذا العدد يبدو مخيفاً في كبره! وهو فعلاً مخيف في كبره. ولكن لم يكن بمقدوري أن أرى كيف يمكن أن أجعله أصغر بكثير من ذلك. إن إجراءات الترميز والتخصيص التي عرضتها عن آلات تورنغ كانت إجراءات معقولة وبسيطة، إلا أن المرء سيصل لا محالة إلى عدد من هذا المستوى الضخم لكي يرمزِّ آلة من آلات تورنغ العامة الحقيقية(7).

قلت فيما سبق إن جميع الحواسيب الحديثة ذات الغرض العام هي في حقيقة الأمر آلات تورنغ عامة. ولم أكن أعني بذلك التلميح إلى أن التصميم المنطقي لهذه الحواسيب ينشد الشبه القريب جداً في كل شيء بنمط أوصاف آلة تورنغ العامة التي كنت أتحدث عنها الآن، بل إن المقصود بذلك أن أي آلة تورنغ عامة، يمكن، بعد تزويدها أولاً ببرنامج مناسب (أي القسم الابتدائي من شريط المدخلات)، إظهارها بمظهر المقلد لسلوك أي آلة تورنغ مهما كانت! فبحسب شرحنا أعلاه، يأخذ البرنامج ببساطة شكل عدد وحيد (هو العدد n). ولكن يمكن اتباع طرق أخرى. إذ إن هناك تنويعات عديدة على فكرة تورنغ الأصلية. والحقيقية أنني

انحرفت قليلاً في شروحي عن الشروح التي قدمها تورنغ في الأصل. ولكن هذه الاختلافات، لا أهمية لها بالنسبة لمتطلباتنا الحالية.

لا حلولية[x] مسألة هلبرت

لقد وصلنا الآن إلى الهدف الذي لأجله، في الأصل، قدم تورنغ أفكاره، وهو حل مسألة هلبرت العاشرة ذات المدى البعيد جداً Entscheidungsproblem والتي تنص على مايلي: هل يوجد نهج آلي لحل جميع مسائل الرياضيات التي تنتمي إلى صف واحد عام محدد تماما؟ لقد وجد تورنغ أن باستطاعته أن يترجم هذا السؤال إلى مسألة (تتعلق بآلته) وهي مسألة البت في السؤال التالي: هل سيأتي وقت تتوقف فيه آلة تورنغ النونية عندما تؤدي عملها أم لا؟ لذلك عرفت هذه المسألة باسم **مسألة التوقف**. ومن السهل (طبعاً) وضع لائحة بأوامر لا تتوقف الآلة المبرمجة وفقها مهما كان العدد m (الذي تمارس عليه عملها) (مثال ذلك n =1 أو 2 كما هو مبين في لائحة سابقة، أو في أي حالة لا يرد فيها الأمر STOP على الإطلاق). وتوجد أيضاً لوائح بأوامر تتوقف الآلة المبرمجة عليها ***مهما كان*** العدد m (مثال n=11)، كما توجد بعض الآلات التي تتوقف لأجل أعداد و لاتتوقف لأجل أخرى. وللمرء كل الحق في أن يقول عن الخوارزمية التي تظل تعمل دائماً دون توقف إنها خوارزميه مزعومة ولا تنفع كثيراً. بل إنها ليست بخوارزمية على الإطلاق. فأمامنا إذن مشكلة مهمة، وهي أن يكون بمقدورنا أن نقرر: هل ستعطي T_n المطبقة على m فعلاً، إجابة ما في نهاية الأمر أم لا! إذا كان ***لا*** (أعني إذا كان الحساب لايتوقف) عندئذ:

$$T_n\,(m) = \square$$

(وتتضمن هذه العبارة كل الأوضاع التي تقع فيها الآلة، في إحدى مراحل عملها، في ورطة، نتيجة لعدم وجود الأمر المناسب الذي يقول لها ما الذي ستفعله ــ كما هو الحال في الآلات الباطلة مثل T_4 و T_7 التي وردت في لائحة سابقة. كما يجب أن نعد الآن، الآلة T_3 أيضاً باطلة للأسف: $T_3\,(m) = \square$ مع أنها بدت ناجحة، لأن نتيجة العمل الذي تقوم به T_3 هو دائماً مجرد شريط أبيض. في حين أننا نطلب وجود إشارة 1 واحدة على الأقل في المخرجات لكي نسند إلى نتيجة الحساب عدداً معيناً! على أن الآلة T_{11} شرعية، لأنها تنتج إشارة 1، وهذا المخرج هو الشريط الذي رقمه 0 ولذلك لدينا $T_{11}\,(m) = 0$ مهما تكن m).

ففي الرياضيات إذن قضية مهمة هي أن يكون بمقدورنا أن نقرر متى تتوقف آلة تورنغ. فعلى سبيل المثال، دعونا ننظر في أمر المعادلة التالية:

$$(x+1)^{w+3} + (y+1)^{w+3} = (z+1)^{w+3}$$

---

[x] اتخذنا الاشتقاق «حَلول» ليعبر (تجاوزاً) عن قولنا: (قابل للحل) ومنه اتخذنا المصدر الصناعي «حَلولية».

(إذا كانت المعادلات الرياضية التقنية تسبب لك الإزعاج فلا تنفر منها نهائياً! فلقد استخدمنا هذه المعادلة على سبيل المثال لا غير، ولا حاجة بك لأن تفهمها بالتفصيل) فهذه المعادلة ذاتها ترتبط بمسألة شهيرة في الرياضيات لم تحل ـ ولربما كانت أشهر مسألة على الإطلاق. وهي هذه: هل يوجد أي مجموعة أعداد طبيعية w,x,y,z تكون هذه المعادلة عندها محققة*؟ لقد ورد النص الشهير الذي عرف باسم «نظرية فيرما الأخيرة» في حاشية كتاب حسابيات ديوفانطس ***Diophantus Arithmetica***، وكان قد سجله أحد رياضيي القرن السابع عشر الكبار وهو بيير دي فيرما Pierre de Fermat (1601-1665). وهذا النص هو إقرار بأن هذه المعادلة لا تتحقق أبداً(8). وعلى الرغم من أن فيرما كان يعمل محامياً (وهو معاصر لديكارت)، فقد كان أرهف الرياضيين حسا في زمانه. ولقد زعم أن لديه « برهاناً رائعاً بحق» على إقراره هذا، ولكن الحاشية أصغر من أن تتسع له. و منذ ذلك الحين لم يستطع أحد أن يقيم مثل هذا البرهان[x] ، كما لم يجد أحد، من جهة ثانية مثالاً معاكسا ينقض إقرار فيرما.

إنه لأمر واضح أنه إذا ***أعطينا*** رباعية الأعداد (w,x,y,z) فستكون المسألة مسألة حساب لكي نقرر هل تتحقق المعادلة أم لا. لذلك يمكننا أن نتخيل وجود ***خوارزميه*** لحاسوب يظل يعمل على جميع رباعيات الأعداد، الواحدة بعد الأخرى، ولا يتوقف إلا عندما تتحقق المعادلة. (رأينا سابقاً أنه توجد طرق لترميز مجموعات منتهية من الأعداد وبطريقة حسوبة، وعلى شريط واحد، أعني بمجرد أعداد مفردة، وهكذا يمكننا أن «نمر بجميع» الرباعيات بمجرد اتباع الترتيب الطبيعي لهذه الأعداد المفردة) فإذا استطعنا أن نثبت أن ***هذه الخوارمية لا تتوقف*** أبداً، عندئذ نكون قد وجدنا برهانا على إقرار فيرما.

ويمكن أن نعبر كذلك بطريقة مماثلة (أي بالاعتماد على آلة تورنغ ومسألة توقفها) عن مسائل رياضية أخرى عديدة لم تحل. من ذلك مثلاً «مخمنة غولدباخ» **Goldbach Conjecture** التي تؤكد أن كل عدد زوجي أكبر من 2 هو مجموع عددين أوليين** . ولكي نعرف هل هذا العدد الطبيعي أو ذاك هو عدد أولي، نلجأ إلى سيرورة خوارزميه لا تحتاج منا إلا لاختبار قابلية

---

* يذكر القارئ أن ما نعنيه بعدد طبيعي هو 0، 1، 2، 3،....... والسبب الذي لأجله أخذنا x +1 وw+3..ألخ. بدلاً من صيغة فيرما الأكثر شيوعاً ($x^n + y^n - z^n, n > 2, x,y,z > 0$) هو أننا نتيح بذلك لـ w,x...ألخ. أن تكون أي عدد طبيعي بدءاً من الصفر.

x يبدو أن الرياضيين، على الرغم من ندرة اتفاقهم، هم الآن شبهه متفقين على صحة البرهان الذي قدمه رياضي بريطاني يدعى **Andrew Wiles**. والبرهان الآن هو قيد التدقيق (راجع مجلة **La Recherche** العدد 257 أيلول 1993).

** إن الأعداد الأولية 2,3,5,7,11,13,17،..... هي كما نذكر الأعداد الطبيعية التي لا تقبل القسمة إلا على نفسها وعلى 1 كلاً على حدة فلا الصفر ولا 1 عددين أوليين (الصفر يقبل القسمة على كل الأعداد إلا على نفسه، و1 يقبل القسمة على نفسه فقط، وهو الواحد نفسه فلا يصح أن يكون عدداً أولياً).

قسمة العدد على الأعداد ***الأصغر*** منه، وهذه مسألة حساب ***منته***. ولكي نتحقق صحة تخمينة غولدباخ، يمكننا ابتكار آلة تورنغ تستطيع أن تمر بجميع الأعداد الزوجية الواحد تلو الآخر وتحاول تفريق كل واحد منها بكل الطرق الممكنة إلى عددين فرديين:

6 = 3+3   8=3+5   10=3+7=5+5

12=5+7   14=3+11=7+7....

ثم نقوم باختبار نتأكد فيه أن ***كل*** عدد زوجي قد قسم إلى عددين كل ***منهما*** عدد أولي (من الواضح أننا لا نحتاج لاختبار انقسام العدد المعطى إلى عددين ***زوجيين***، ما عدا 2+2=4، لأن جميع الأعداد الأولية هي أعداد فردية ما عدا 2). ويفترض في آلتنا أنها لن تتوقف إلا حين تصل إلى عدد زوجي ***لا يوجد*** بين أزواج الأعداد التي قسم إليها زوج مكون من عددين أوليين. ففي هذه الحالة سيكون لدينا مثال معاكس لمخمنة غولدباخ: أعني عدداً زوجياً (أكبر من 2) ***ليس*** مجموعاً لعددين أوليين. لذلك إذا استطعنا أن نقرر هل ستتوقف هذه الآلة أم لن تتوقف أبداً، نكون قد امتلكنا وسيلة للبت في صحة تخمنة غولدباخ.

وهنا يبرز سؤال طبيعي: كيف سنقرر أن آله تورنغ هذه أو تلك ستتوقف في لحظة ما أم لا (عند تلقيمها مدخلات معينة)؟ قد لا تكون الإجابة عن هذا السؤال صعبة بالنسبة للكثير من آلات تورنغ. ولكن قد تتضمن الإجابة أحياناً (كما رأينا سابقاً) حلا لمسألة رياضية غير مبتوت فيها. فهل يوجد إذن منهج خوارزمي آلي محض يجيب إجابة عامة عن مسألتنا ــ وهي مسألة التوقف؟ لقد أثبت تورنغ أنه، في الواقع، لا يوجد.

وكان برهانه في أساسه يقوم على مايلي: لنفرض في البدء عكس ذلك، وأن هذا الخوارزمي موجود*. عندئذ توجد آلة تورنغ H تستطيع أن تقرر هل ستتوقف آلة تورنغ التي ترتيبها n أخيراً عندما تقوم بعملها على العدد m أم لا. فدعونا نقول إن H تخرج الشريط رقم 0 عندما لا تتوقف Tn والشريط رقم 1 عندما تتوقف. أي أن:

$H(n;m)$=0 إذا لم تتوقف T_n (m) أي T_n(m) = □

H(n;m)=1 إذا توقفت T_n (m)

ولقد كان بإمكاننا أن نتبع في ترميز الزوج (n,m) القاعدة نفسها التي تبنيناها في حالة آلة تورنغ العامة U. على أن هذا الأمر يمكن أن يصطدم بالمسألة التقنية التي واجهتنا في حالة بعض الأعداد n (مثل 7=n) التي ليس لـ T_n فيها اختصاص. كما أن الإشارة 111110 لن تكون كافية لفصل nعن m على الشريط. ولكي نتحاشى هذه المشكلة، دعونا نفترض أن n مرمزة باستخدام التدوين الثنائي **الموسع** بدلاً من التدوين الثنائي البسيط وأن m مدونة بالتدوين الثنائي العادي كما كان من قبل.

---

* يعرف هذا النهج الرياضي الشائع ـ القوي ـ في البرهان باسم البرهان بالخلف (أو بنقض الفرض المخالف). وفيه يفترض المرء أن ما يحاول إثباته هو خطأ ثم يتوصل من هذا الفرض إلى تناقض. وهذا ما يثبت أن النتيجة المطلوبة هي فعلاً صحيحة.

عندئذ ستكفي الإشارة 110 في الحقيقة لفصل n عن m. ثم إن استخدام ***نقطة مع فاصلة*** (;) في H(n;m)، المتميزة عن ***الفاصلة*** في U (n , m)، لم يكن إلا للإشارة إلى هذا التبديل.

لنتصور الآن مجموعة غير منتهية من الأعداد المرتبة في جدول يتضمن جميع المخرجات الناتجة من كافة آلات تورنغ الممكنة التي تقوم بعملها على كل ما يمكن مـن المدخـلات المختلفـة. وفي هذا الجدول يعرض السطر النوني مخرجات آلة تورنغ التي ترتيبها n بعـد تطبيقهـا علـى مختلـف المدخلات: 4,3,2,1,0...

$n \downarrow$ \ $m \rightarrow$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	...
0	□	□	□	□	□	□	□	□	□	...
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	...
2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	...
3	0	2	0	2	0	2	0	2	0	...
4	1	1	1	1	1	1	1	1	1	...
5	0	□	0	□	0	□	0	□	0	...
6	0	□	1	□	2	□	3	□	4	...
7	0	1	2	3	4	5	6	7	8	...
8	□	1	□	□	1	□	□	□	1	...
.	.				.				.	...
.	.				. .				.	
.	.				.				.	
197	2	3	5	7	11	13	17	19	23	...
.	.				.				.	
.	.				.				.	
.	.				.				.	

لنلاحظ أني لم اكن وفياً في هذا الجدول، لأني لجأت فيه إلى بعض التحريف، فلم أدرج فيه آلات تورنغ كما هي مرقمة ***في الواقع***. فقد كان علي، لكي أفعل ذلـك، تقديـم جـدول يبـدو البدء فيه مضجراً جداً. لأن جميع الآلات التي رقمها أصغـر مـن 11 لا تعطـي أي شـيء سـوى المربعات □، وحين تكون n = 11 لا نحصل على شيء سـوى الأصفـار. لذلـك، ولكـي يبـدو الجدول منذ البدء أكثر إثارة للاهتمام، فرضت أن هناك ترميزا أكثر تمثيلاً للفكرة قد تم إنجـازه. فما قمت به في واقع الأمر، لا يتعدى أني جمعت معطياته بصورة عشوائية واضحة، وذلك لكي أعطي انطباعاً بالمظهر العام الذي كان يمكن أن يبدو فيه.

ليس مهماً أن نكون قد قمنا فعلاً ***بحساب*** هذا الجدول مستعينين مثلاً ***بخوارزمية*** ما (بـل لا وجود في حقيقة الأمر لمثل ***هذه الخوارزمية*** كما سنرى بعد برهة) وكل ما يفترض فينـا هـو أن ***نتخيل*** أن الجدول ***الحقيقي*** قد أنجز وأنه أصبح تحت أبصارنا. (والحقيقة أننا لـو حاولنـا حسـابه فعلاً، لصادفتنا الصعوبات بسبب عجزنا عن توقع ظهور المربعات. لأننا لا نعرف معرفة أكيـدة

متى سيوضع مربع في هذا المكان أو ذاك، وذلك ببساطة لأن هـذه الحسـابات قـد تظـل سـائرة باستمرار، ولا نعرف هل ستتوقف أم لا).

ولكن سبق أن افترضنا منذ قليل أن هنـاك دالـة H نسـتطيع باسـتخدامها معرفـة أن $T_n(m)$ ستتوقف أم لا، أو بمعنى آخر معرفة أين تظهر المربعـات وأيـن لا تظهـر. ***فلنفـترض*** أننـا نظمنـا الجدول بهذه الطريقة. ولكن دعونا نستخدم H بدلاً من ذلك لمعرفة مكان كل مربع ووضـع 0 مكانه. الأمر الذي يتطلب حساب $H(n;m)$ قبل حساب نتيجة عمل T_n على m. وعندئـذ لـن نسـمح لقيـام T_n بعملهـا علـى m إلا إذا كـان $H(n;m) = 1$ (أعـني فقـط إذا كـان حسـاب $T_n(m)$ يؤدي فعلاً إلى نتيجة). أما إذا كان $H(n , m) = 0$ (أعـني إذا كـان □ = $T_n(m)$ فمـا علينا إلا أن نكتب 0, ويمكننا أن نعـبر عـن نهجنـا الجديـد (أعـني الـذي نحصـل عليـه بحسـاب *H(n;m)* قبل حساب $T_n(m)$ بالكتابة التالية:

$$T_n(m) \times H(n;m)$$

(وفي ذلك أستخدم اصطلاحاً رياضياً شائعاً بشأن ترتيب العمليات الرياضية. فالمؤثر الأيمـن هو الذي يتم إنجازه أولاً. مع ملاحظة أن لدينا بطريقة الرموز 0=0×□).

واعتمادا على ذلك يصبح الجدول على النحو التالي:

$n \downarrow$ \ $m \rightarrow$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	...
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	...
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	...
2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	...
3	0	2	0	2	0	2	0	2	0	...
4	1	1	1	1	1	1	1	1	1	...
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	...
6	0	0	1	0	2	0	3	0	4	...
7	0	1	2	3	4	5	6	7	8	...
8	0	1	0	0	1	0	0	0	1	...
.	.				.				.	
.	.				.				.	
.	.				.				.	

وهنا نلاحظ أنه، بعد فرض H موجودة، أصبحـت أسـطر هـذا الجـدول كلهـا مكونـة مـن ***متتاليات حسوبة***. و(نعني بقولنا متتالية حسوبة أنها متتالية لا نهائية يمكن توليد قيمهـا المتعاقبـة بواسطة ***خوارزمية معينة***، أي توجد آلـة تورنـغ يمكنهـا أن تعطـي عنـد تطبيقهـا علـى الأعـداد الطبيعية 0،1،2،3،4،5،..... على التوالي عناصر المتتاليـة المتعاقبـة). والآن نسـجل ملاحظاتنـا، فيما يتعلق بهذا الجدول، حول حقيقتين، أولاهما: أن كل متتالية حسوبة من الأعـداد الطبيعيـة يجب أن تظهر في مكان ما في أسطر هذا الجدول (وربما أكثر مـن مـرة). وهـذه خاصـة كـانت سابقاً صحيحة من الجدول الأصلي الذي يحوي مربعات □. لأن ما فعلناه لا يتعدى أننا ***أضفنـا***

بعض الأسطر لكي تحتل مكان آلات تورنغ «الباطلة» (أعني التي تسفر عن مربع واحد على الأقل). وثانيها: أن الفرض الذي افترضناه بأن آلة تورنغ H موجودة فعلاً، يعني أن هذا الجدول قد ***تولد بطريقة حسوبة*** (أي أنه قد تولد ***بخوارزمية معينة معرفة***) وهي الإجراء $T_n(m) \times H(n;m)$. الأمر الذي يعني قولنا: توجد آلة تورنغ Q تعطي، حين تقوم بعملها على زوج الأعداد (n,m)، المدخل المناسب إلى الجدول (أي العدد الذي يجب وضعه في سطر n عمود m). لذلك نستطيع أن نرمزّ n و m على شريط Q بالطريقة نفسها التي ذكرت عن H فلدينا إذن:

$$Q(n;m) = T_n(m) \times H(n;m)$$

سنطبق الآن شكلاً جديداً من وسيلة عبقرية فعالة هي طريقة كانتور **Georg Cantor** في الخط القطري (وسنرى الشكل الأصلي لوسيلة كانتور هذه في الفصل القادم). ولأجل ذلك، دعونا ننظر إلى عناصر القطر الرئيسي التي ميزناها الآن بخط **قاتم**:

0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	**0**	0	0	0	0	0	0	0
1	1	**1**	1	1	1	1	1	1
0	2	0	**2**	0	2	0	2	0
1	1	1	1	**1**	1	1	1	1
0	0	0	0	0	**0**	0	0	0
0	0	1	0	2	0	**3**	0	4
0	1	2	3	4	5	6	**7**	8
0	1	0	0	1	0	0	0	**1**
.				.				.
.				.				.
.				.				.

فهذه العناصر تكوّن متتالية معينة هي 0، 0، 1، 2، 1، 0، 3،0،..... نضيف إلى كل حد من حدودها 1 فتتكون لدينا المتتالية:

1،1،2،3،2،1،4،8،2،.......

ومن الواضح أن هذا الإجراء (الذي قمنا به) حسوب. ولما كان الجدول نفسه قد تولد بطريقة حسوبة، فما استنتجناه منه هو أيضاً متتالية جديدة حسوبة، وهي بالفعل المتتالية (المعينة بالإجراء): $1+Q(n ; n)$ أعني:

$$1+T_n(n) \times H(n;n)$$

(لأن القطر يتعين بجعل m مساوية n). ولكن جدولنا يحتوي على كل المتتاليات الحسوبة، لذلك لا بد أن تكون هذه المتتالية الجديدة هي أحد أسطر هذا الجدول. على أن هذا الأمر غير ممكن! لأن هذه المتتالية الجديدة تختلف عن السطر الأول بأول حدوده، وتختلف عن الثاني بثاني حدوده وتختلف عن الثالث بثالث حدوده، وهكذا. وهذا تناقض جلي. لذلك فإن

الفرض الذي قام عليه (وهو أن H موجودة) هو فرض خاطئ. بمعنى أنه لا وجود لـ H، وهـذا ما كنا نحاول إثباته ! إذن، ***لا توجد خوارزمية عامة لكي تقرر هل ستتوقف آلة تورنغ أم لا .***

توجد طريقة أخرى للتعبير عن هذه الحجة، وهي أن نلاحظ أنه بفرض H موجودة، عندئـذ توجد لأجل الخوارزمية $1+Q(n;n)$ آلة تورنغ، وليكن رقمها k. فيكون لدينا:

$$1+Q(n;n) = 1+T_n(n) \times H(n;n) = T_k(n)$$

ولكن إذا عوضنا n=k في هذه العلاقة (لاتباع سيرورة القطر) نحصل على:

$$1+ T_k(k) \times H(k\,;\,k) = T_k(k)$$

وهـذا تنـاقض، لأن $T_k\ (k)$ إذا توقفـت، تكـون $H(k\,;\,k) = 1$ ونحصـل علـى المسـاواة المستحيلة:

$$1+T_k(k) = T_k(k)$$

في حين أنه إذا لم تتوقف $T_k(k)$ (لأن $H(k\,;\,k) = 0$)، نحصل على المساواة غير المتسقة:

$$1+ 0 = \square$$

إن مسألة توقف أو عدم توقف آلة معينة من آلات تورنغ هي إحدى القضايـا الـتي لا لبـس فيها أبداً في الرياضيات (ولقد سبق أن رأينـا بالمقـابل، أن في الرياضيـات مسـائل مهمـة مختلفـة يمكن أن نعبرعنهابتوقف آلة تورنغ). مـن ذلـك أن تورنـغ نفسـه، بعـد أن أثبـت عـدم وجـود خوارزمية تبت في مسألة توقف آلة تورنغ، استنتج أنه لايمكن أن توجد خوارزمية عامة تبت في مسائل الرياضيات (وهذا ما اثبته أيضاً تشيرش مسـتخدماً نمطـه الخـاص المختلـف في البرهـان). فمسألة هلبرت العاشرة إذن Entscheidungsproblem ليس لها حل!

ولكن هذا لا يعني أنه لن يكون بمقدورنا أن نقرر، في ***أي حالة من الحـالات***، صحـة قضيـة معينة أو بطلانها أو أن نقرر أن آلة معينة مـن آلات تورنـغ ستتوقف أم لا. إذ يمكـن بتدريـب البراعة فينا أو بمجرد حسنا السليم، أن نصبح قادرين على البـت في مسـائل كهـذه في حـالات خاصة (فمثلاً إذا لم تحو لائحة أوامر إحدى آلات تورنغ، أي أمر بالتوقف، أو حـوت ***أوامـر توقف فحسب***، فعندئذ يكفي حسنا السليم وحده ليخبرنـا هـل ستتوقف هـذه الآلـة أم لا!). ***ولكن لا وجود لخوارزمية واحـدة تصلـح*** لأجـل ***جميـع*** مسـائل الرياضيـات، أو لجميـع آلات تورنغ أو لجميع الأعداد التي يمكن أن تمارس عليها عملها.

قد يبدو أننا اثبتنا الآن أن هناك على الأقل ***بعض*** القضايا الرياضيـة الـتي لا يمكـن البـت في أمرها [والتي سنسميها غير بتوتة]، إلا أننا لم نفعل شيئاً من ذلك! ***فنحن لم*** نثبت أن هنـاك آلـة تورنغ يتميز نمط جدولها بإرباكاته، حتى ليستحيل معها استحالة مطلقة بمعنى مـا أن نقـرر هـل ستتوقف هذه الآلة أم لا عند تلقيمها بعدد معين يسبب لنا إرباكاً غير عادي - بل مـا فعلنـاه في الواقع هو العكس تماماً كما سنرى بعد برهة. ولم نقل شيئاً، أياً كان، بشأن لا حلولية المسـائل بمفردها، وإنما تحدثنا فحسـب عـن عـدم وجـود حلـول خوارزميـة لطوائـف مـن المسـائل. أمـا

الجواب في كل حالة ***بمفردها*** فهو إما «نعم» وإما «لا» حتى أنه من المؤكـد وجـود خوارزميـة تقرر هذه الحالة الخاصة، وهي الخوارزمية ***الـتي تقـول «نعـم» ليس إلا*** عندما تعرض المسـألة عليها، أو الخوارزمية التي تكتفي بقول «لا»، بحسب مقتضى الحال! والصعوبة، طبعـاً هـي أننـا قد لا نعرف أياً من هاتين الخوارزميتـين نسـتعمل!تلـك مسـألة تتعلـق بتقريـر الحقيقـة الرياضيـة لإفادة بمفردها !وليست مسألة تقرير منهجي لطائفة من الإفـادات. لذلـك يجـدر بنـا أن نـدرك بوضـوح أن الخوارزميـات ليسـت هـي بذاتهـا الـتي تقـرر الحقيقـة الرياضيـة، بـل إن ***شـرعية الخوارزمية*** يجب أن تثبتها دائماً وسائل خارجية.

كيف نتفوق على إحدى الخوارزميات

سنعود إلى مسألة البت هذه في صحة الإفادات الرياضية فيما بعد بصدد الحديث عن نظريـة غودل (انظر الفصل الرابع). أما الآن فآمل أن أوضح أن برهان تورنغ في الحقيقـة، ليس سـلبياً كما يبدو أني ألمحت إليه حتى الآن، وإنما هو بنـاء أكـثر مـن ذلـك بكثـير، وأقـل سـلبية. فمـن المؤكد أننا لم نعرض آلة تورنغ خاصة يستحيل لأجلها بمعنى مطلق أن نقرر هل ستتوقف أم لا. وإذا تمعنا فعلاً بكل حرص في البرهان، نجد أن نهجنا نفسه قد أعطانا الإجابة ضمنـاً في حقيقـة الأمر بالنسبة للآلات التي تسبب في الظاهر «إرباكاً اسـتثنائيا» والـتي يتـم إنشـاؤها باسـتخدام نهج تورنغ!

دعونا نرى كيف يحصل هذا. لنفترض أن لدينا خوارزمية نستفيد منها أحيانـاً بأنهـا تعلمنـا أن هذه الآلة أو تلك من آلات تورنغ لن تتوقف. إن نهج تورنغ، كما أوجزنـا عرضـه سـابقاً، سيظهر بجلاء حساباً لإحدى آلات تورنغ، يكـون مـن النـوع الـذي لا يمكـن لهـذه الخوارزميـة الخاصة أن تقرر هل سيتوقف هذا الحساب أم لا. على أن هذه الخوارزمية تمكّننا بعملها هـذا في الواقع من رؤية الإجابة في هذه الحالة! وهي أن حساب آلة تورنـغ الخاصـة الـذي وجدنـاه لـن يتوقف في الحقيقة.

ولكي نرى كيف يحدث ذلك بـالتفصيل، دعونـا نفـترض أن هـذه الخوارزميـة الـتي تفيدنـا أحياناً، جاهزة لدينا ولنشر إليها كمـا فعلنـا سـابقاً (باعتبارهـا آلـة تورنـغ) بـالرمز H ، ولكـن لندخل في حسابنا الآن أن ليس من المؤكد دائماً أن هذه الخوارزمية ستخبرنا بأن ألة تورنغ لـن تتوقف في حقيقة الأمر:

$$H(n;m)=0 \text{ أو } \square \text{ إذا كان } T_n(m)=\square \quad ^{x}$$

$$H(n;m)=1 \text{ إذا توقفت } T_n(m)$$

وهكذا فإن $H(n;m)=\square$ هي الإمكانية التي تنجم حـين يكـون $T_n(m)=\square$ والحقيقـة أن باستطاعتنا إيجاد العديد مـن هـذه الخوارزميـات $H(n;m)$ (فمثـلاً يمكـن أن نبسـط الأمـر

---

[x] إن هذه الحالة التي عرضنا فيها أن H لا يمكن أن يعلمنا بأن الآلة ستتوقف هي التي ظل يشار إليها بالمربع

ونفرض أن H (n ; m) تقتصر على إعطاء 1 عندما تتوقف T_n(m). على ان هـذه الخوارزميـة الخاصة لن تكون ذات فائدة عملية كبيرة جداً).

والآن يمكننا أن نسير على خطوات تورنغ بالتفصيل كما ذكرت سابقاً ما عدا التعويض عن جميع المربعات □ بأصفار، إذ ستبقى لدينا بعض المربعات. وكما في السابق، سنحصل من الطريقة القطرية على الحد النوني في القطر. وهو:

$$1+ T_n (n) \times H(n ; n)$$

(الذي نجد أن ناتجه □ كلما كـان H(n ; n)= □. إذ نلاحـظ أن: □ =□ x □؛ □=□+1)
وهذه عملية حسابية لا لبس فيها لذلك يمكن أن تنجزها آلة خاصـة مـن آلات تورنـغ، ولتكـن تلك التي ترتيبها k، إذن:

$$1+ T_n (n) \times H (n ; n) = T_k(n)$$

فبعد البحث عن الحد القطري الذي ترتيبه k نحصل على

$$1+ T_k (k) \times H(k ; k) = T_k(k)$$

فإذا توقفت العمليات الحسابية للآلة $T_k(k)$ نحصل على تناقض (لأنه حين تتوقف $T_k(k)$ يكـون $H(k ; k)$ مساوياً 1 وعندئذ تصبح المعادلة السابقة غير متسقة، لأنها تصبح:

$$1_+ T_k (k) \times 1= T_k(k)$$

لذلك لا يمكن أن تتوقف $T_k(k)$

أي : $T_k (k) =$ □

ولكن لايمكن للخوارزمية H أن تتنبؤ عن ذلك، لأنه إذا أعطى $H(K;K)= 0$ حصلنا ثانية على تناقض (إذ سيكون لدينا العلاقة الرمزية الباطلة □ = 1+0).

إذن لو استطعنا إيجاد k لعرفنا كيف ننشئ حسابنا الخاص لكي نتغلب على الخوارزمية (H) التي نعرف جوانبها فقط ! فكيف نجد k؟ هذا عمل شاق، إذ علينا أن نتمعن بالتفصيل في إنشاء H(n ; m) و T_n (m) ، وأن نـرى عندئـذ بـالتفصيل كيـف يقـوم $1+ T_n (m) \times H(n ; n)$ بعمله باعتباره آلة من آلات تورنغ. وعندئذ نجد ترتيب هذه الآلة، الذي هو k، وسيكون تنفيـذ ذلك بالتفصيل معقداً بلا شك ـ ولكن يمكن القيام به *. وما كنا لنهتم إطلاقاً، بسبب التعقيـد، بالحساب $T_k(k)$ لولا حقيقة واحدة وهي أننا حصلنا عليه بصورة اسـتثنائية لكـي نتغلـب علـى الخوارزمية H ! والمهم في الأمر هو أنه، مهما كانت H المفروضة، فإن لدينا نهجـاً لا لبـس فيـه لكـي نجـد k الموافقـة لهـا والـتي نعـرف أن آلـة تورنـغ $T_k(k)$ الموافقـة لـــ k تتفـوق علـى H،

* إن أصعب جزء في الحقيقة من هذا العمل، كان قد أنجز سابقاً بإنشاء آلة تورنغ العامة U . لأن هذه الآلة تمكننا من كتابة T_n(n) كآلة تورنغ تقوم بعملها على n.

والتي بواسطتها نستطيع أن نقوم بعمل أحسن من الخوارزمية. وقد يفيدنا اقليلاً الاعتقاد بأننا أفضل من مجرد خوارزميات!

إن النهج المذكور في الحقيقة معرف تعريفاً جيداً، حتى أنه بمقدورنا إيجاد خوارزمية للحصول على k بعد إعطاء H. لذلك علينا أن نتأكد، قبل أن ننعم بالرضى، بأن هذه الخوارزمية يمكن أن تكون محسنة [9] عن H لأنها «تعلم» في الحقيقة بأن $\square = T_k(K)$ ـ أو (بالأحرى) هل تعلم ذلك؟ إن استخدامنا فيما سبق للتعبير الإنساني «تعلم» ونسبته للخوارزمية كان للمساعدة. وعلى رغم ذلك، ألسنا نحن من يقوم بفعل «المعرفة» في حين أن الخوارزمية هي التي تسير بالضبط وفق القواعد التي وضعناها لها لكي تتبعها؟ أم أننا نحن أنفسنا نتبع فحسب قواعد كنا قد بُرمجنا لكي نتبعها عن طريق أدمغتنا وطريق محيطنا؟ إن المسألة حقاً ليست مجرد مسألة خوارزميات، وإنما هي أيضاً مسألة كيف يتسنى لنا أن نحكم بما هو صحيح وما هو غير صحيح. تلك هي القضايا الجوهرية التي سنعود إليها فيما بعد. أما مسألة الحقيقة الرياضية (وطبيعتها اللاخوارزمية) فسننظر فيها في الفصل الرابع. ولابد لنا الآن من أن نكوّن ولو بعض الإحساس على الأقل، بمعاني التعابير «خوارزمية» و«حسوبية» وأن نفهم شيئاً من القضايا المتعلقة بهما.

حساب تشيرش اللمبدائي[x]

من الأفكار الهامة جداً والجميلة في الرياضيات، مفهوم الحَسوبية الذي يلفت النظر أيضاً بحداثته رغم بساطته. فقد عرض أول ما عرض في عام 1930 ـ ولكن أموراً كهذه وبمثل طبيعتها الأساسية تحدث في الرياضيات. وفكرة الحسوبية تخترق **جميع** مجالات الرياضيات (على الرغم مما قد يكون مؤكداً بأن معظم الرياضيين قلما يشغلون أنفسهم بمشاكل الحسوبية حتى الآن). وتكمن قوة هذه الفكرة إلى حد ما في أن هناك بعض العمليات الرياضية غير حسوبة في الواقع على الرغم من كونها معرّفة أحسن تعريف (من ذلك مثلاً توقف، أو عدم توقف آلة تورنغ بوجه عام. وسنرى أمثلة في الفصل الرابع). ولو لم توجد مثل هذه العمليات غير الحسوبة، لما كان لمفهوم الحسوبية مثل هذه الأهمية الرياضية: إذ إن الرياضيين، في النتيجة، يحبون المعضلات. فمن الجائز بالنسبة لهم أن يكون أمر البت في عمليات رياضية، وهل هي حسوبة أم لا، معضلة مراوغة. بل إنها مراوغة بصورة استثنائية لأن الحل العام لهذه المعضلة هو نفسه غير حسوب.

بقي علينا أن نوضح أمراً واحداً، وهو أن الحسوبية فكرة رياضية أصيلة «مطلقة». إنها فكرة مجردة تتجاوز كثيراً كل تحقق خاص تم بدلالة «آلات تورنغ» كما سبق لي أن وصفتها. ولسنا بحاجة، كما لاحظت من قبل، لأن نعلق أي أهمية خاصة على «الأشرطة» و «الحالات

---

[x] لمبدائي نسبة إلى لمبدا، وهو الحرف اليوناني $\boldsymbol{\lambda}$

الداخلية» وغيرها التي تميز محاولة تورنغ البارعة بل الفريدة. وتوجد أيضاً طرق أخرى للتعبير عن فكرة الحسوبية، كانت أولاها تاريخياً هي «الحساب اللمبدائي» الرائع الذي وضع مواصفاته المنطقي الأميركي ألونزو تشيرش Alonzo Church بمساعدة ستيفن س. كلين Stephen C. Kleene . وقد كان نهج تشيرش مختلفاً كل الأختلاف عن نهج تورنغ وأكثر تجريداً منه بصورة بارزة: ففي الصيغة التي وضع فيها تشيرش أفكاره يكاد لا يوجد أي ارتباط واضح بينها وبين أي شيء يمكن للإنسان أن يصفه بأنه «آلي». أما الفكرة الأساسية الكامنة خلف نهج تشيرش فهي في الحقيقة، ***مجردة*** في أصل جوهرها - إنها عملية رياضية أطلق عليها تشيرش بالفعل اسم «تجريد».

إني أشعر بأن اعطاء وصف مختصر لمخطط تشيرش جدير بأن نصرف له بعض الوقت، لا لأنه يلح على أن الحسوبية فكرة رياضية مستقلة عن أي مفهوم خاص بالآلة الحاسبة فحسب، بل لأنه يجسد قوة الأفكار المجردة في الرياضيات. أما القارئ غير الملم بالأفكار الرياضية، وغير المبهور بهذه الأشياء لذاتها فيمكنه أن ينتقل عند هذا الحد إلى الفصل التالي – وهو لن يخسر شيئاً مهما في مجرى البراهين، ومع ذلك أعتقد أن هؤلاء القراء يمكنهم أن يستفيدوا من البقاء معي لمدة أطول، فيشهدون بذلك بعض التوفير السحري في مخطط تشيرش (انظر Church 1941).

في هذا المخطط، ينصب اهتمامنا على «عالم»من الأشياء، يشار إليها مثلاً بالرموز.

a,b,c,d,.....z,a′,b′,c′,,.......z′,a,b,c,........ a,b,c,..........

وكل واحد من هذه الرموز يمثل عملية رياضية أو ***دالة***. (وقد استخدمنا أحرفاً مشكلة بالفتحات لكي نفسح مجالاً لعدد غير محدود من الرموز التي تشير إلى قدر ما نريد من الدوال).

وأما «منطلقات»[x] هذه الدوال - ونعني بذلك الأشياء التي تمارس الدوال عليها عملها - فهي أشياء أخرى من النوع نفسه، أعني أنها هي أيضاً دوال. ثم إن محصلة (أو " قيمة") دالة من هذه الدوال المؤثرة في أخرى، هي أيضاً دالة. (ففي نظام تشيرش، اقتصاد رائع إذن بالمفاهيم).

وعلى هذا النحو، عندما نكتب[*] :

a=bc

---

[x] أو مدارات أو محاور. وقد اخترنا كلمة «منطلق» لشيوع استعمالها في تعريف الدالة إذ إن كل دالة لها منطلق ومستقر.

[*] كان من الممكن اتباع صيغة للتدوين أكثر شيوعاً وهي a= b(c) . ولكن هاتين القوسين ليستا في الحقيقة ضروريتين. والأفضل أن نعتاد على حذفهما. لأن الإصرار على ضمها سيؤدي إلى صيغ مربكة مثل (f (p)) (q) و (r) ((f ((p)) ((q)) بدلاً من fp) q) و fp)q) r)) على الترتيب

نعني أن حصيلة الدالة b عند تأثيرها في الدالة c هو دالة أخرى a. ولا توجد صعوبة في التعبير عن فكرة دالة لمتغيرين أو أكثر في هذا المخطط. فإذا أردنا اعتبار f دالة لمتغيرين q,p مثلاً، نستطيع أن نكتب ببساطة

$$(fp)q$$

(التي تدل على محصلة الدالة fp عند تطبيقها على q). ولتمثيل دالة لثلاث متغيرات، نأخذ التدوين:

$$((f\,p)\,q))r$$

وهكذا دواليك.

والآن، أتى دور عملية التجريد القوية التي سنستخدم لها الحرف اليوناني λ (لمبدا)، ثم نتبعه مباشرة بالحرف الذي يمثل إحدى دالات تشيرش، وليكن x، الذي نعتبره «متغيراً أخرس». وكل ظهور عندئذ للمتغير x في العبارة داخل القوسين [ ] التي تلي x الخرساء مباشرة، يُعد مجرد "نافذة" يمكن أن نبدلها بأي شيء يلي العبارة بأكملها. وهكذا إذا كتبنا:

$$\lambda\, x .[\, f x \,]$$

كان المقصود بذلك هو الدالة التي تفضي عند تأثيرها في a مثلاً، إلى المحصلة f a. الأمر الذي يعني أن:

$$(\lambda\, x.[\, f x \,])\; a = fa$$

أو بعبارة أخرى، إن $\lambda\, x.[\, f x \,]$ يعني f ليس إلا، أو :

$$\lambda\, x .[\, f x \,] = f$$

الأمر الذي لا يستحق منا سوى قليل من التفكير. فهو واحد من تلك التفاصيل الرياضية التي تبدو في البدء مفذلكة وتافهة، وأن المرء معرض لأن لا يفهمها. دعونا نرى مثالاً مأخوذاً من الرياضيات المدرسية المألوفة. لنفرض أن الدالة f هي العملية المثلثاتية التي تعطي جيب زاوية. فالدالة المجردة «sin» (أي جيب) معرفة (برموزنا الجديدة) كما يلي:

$$\lambda\, x.[\, \sin x \,] = \sin$$

(وليس للقارئ أن يهتم كيف يمكن " للدالة " x أن تكون زاوية. فبعد قليل سنأخذ فكرة عن الطريقة التي يمكن أن تكون فيها الأعداد دوالا والزاوية نفسها ليست سوى عدد). ***وهذا*** أيضاً ***يبدو*** بالفعل تافهاً حتى الآن. ولكن دعونا نتصور أن الرمز " sin" لم يكن قد ابتكر، ولكننا على علم بعبارة السلسلة التامة المعبرة عن sinx:

$$x - (1/6)\, x^{3} + (1/120)\, x^{5} - \ldots\ldots$$

عندئذ نستطيع أن نعرف sin بأنها:

$$\sin = \lambda\, x.[\, x - (1/6)x^{3} + (1/120)\, x^{5} - \ldots\ldots\ldots\ldots \,]$$

والأبسط من ذلك أيضاً، كما نلاحظ، هو أن باستطاعتنا أن نعرّف عملية، ولتكن «سُدس مكعب»، التي لا يوجد لها رمز دالي متعارف عليه (مثل الرمز sin في حالة الجيب). ولنكتب:

$$Q = \lambda x.[(1/6)\, x^3]$$

فنجد مثلاً، أن:

$$Q(a+1) = \lambda x.[(1/6)\, x^3\,](a+1)=(1/6)(a+1)^3$$

أو:

$$Q(a+1)=(1/6)a^3+(1/2)a^2 +(1/2)a+(1/6)$$

إن من الأنسب لدراستنا الحالية، هو أن نأخذ تعابير مكونة فقط من عمليات دالية أولية وضعها تشيرش، مثل:

$$\lambda f.[\, f\,(fx)].$$

وحين تؤثر هذه الدالة في دالة أخرى، ولتكن g تعطي g مكررة مرتين مؤثرة في x. أعني:

$$(\lambda f.\ [\, f\,(fx)]\ g) =g(gx)$$

وكان بإمكاننا أيضاً أن نفصل x أولاً، لكي نحصل على:

$$\lambda f.\ [\ \lambda x.[f(fx)]]$$

التي يمكن أن نختصرها إلى:

$$\lambda fx.[\ f(fx)]$$

وهذه هي العملية التي إذا أثرت في g تعطي في الحقيقة «الدالة g مكررة (التأثير) مرتين» وهي الدالة نفسها التي طابقها تشيرش مع العدد الطبيعي 2:

$$\mathbf{2}=\lambda fx.[\ f(fx)]$$

وهكذا فإن $(2g)y=g(gy)$.وعلى هذا النحو عرف أيضاً:

$$\mathbf{3} = \lambda fx.\ [\ f(f(fx))] \qquad \mathbf{4}= \lambda fx.[f\,(\ f(f(\ fx)))\ ]\ldots\ldots$$

إضافة إلى أن :

$$\mathbf{1}= \lambda fx.[\ fx\ ] \qquad \mathbf{O} = \lambda fx.[x\ ]$$

والحقيقة أن معنى " **2** " عند تشيرش هو أشبه بمعنى "مثنى" و " **3** " بـ " ثلاث " .....وهكذا فإن تأثير **3** في دالة f ، أعني 3f في y هو العملية التي تكرر f ثلاث مرات. لذلك تأثير

$$(3f)y =f(f(f(y\,)))$$

دعونا نرى كيف يمكن التعبير في مخطط تشيرش عن أبسط عملية حسابية وأعني بها جمع **1** إلى عدد طبيعي، لنعرف الدالة:

$$S= \lambda abc\ .[\ b(\ (ab\ )c)\ ]$$

لكي نوضح أن تأثير S يقتصر على جمع **1** إلى عدد معبر عنه بطريقة رموز تشيرش، دعونا نختبره بمثال:

$$\mathbf{S3} = \lambda\, a\,bc\ .[\ b\ ((\ ab\ )\ c)]\ \mathbf{3} = \lambda\, bc.\ [\ b((\ \mathbf{3}b\ )\ c)\ ]$$

$$=\lambda\, bc\ .[b(\ b(\ b(bc)))] = \mathbf{4}$$

لأن $(3b)\ c = b(b\ (bc))$. ومن الواضح أن هذا ما ينطبق بحذافيره على أي عـدد طبيعـي آخـر غير 3 (في الواقع أن $\lambda\ abc.|(ab)\ (bc)|$ كانت ستقوم بعمل S ذاته أيضاً).

ماذا عن ضرب عدد بإثنين؟ إن هذه المضاعفة يمكن أن تتم باستخدام الدالة:

$$D = \lambda\ abc\ .|(ab)\ ((ab)\ c)|$$

ويمكن أن يتضح ذلك بتأثير D في **3** مثلاً:

$$\mathbf{D3} = \lambda\ abc\ .|(ab)\ ((ab)\ c)|\ \mathbf{3} = \lambda\ bc.\left[(3b)\ ((3b)c)\right]$$
$$= \lambda\ bc\ .|\ (3b)\ (b(b(bc)))| = \lambda\ bc\ .|\ b(b(b(b(b(bc)))))| = \mathbf{6}$$

ويمكن، في الواقع، أن نعرف العمليات الحسابية الأساسية: الجمع والضرب والرفع إلى قوة، على الترتيب كما يلي:

الجمع: $A = \lambda\ f\,g\ x\ y\ .|((fx)\ (gx))\ y\ |$

الضرب: $M = \lambda\ f\,g\ x.|\ f(gx\ )|$

الرفع إلى قوة: $P = \lambda\ f\,g\ .|\ fg\ |$

وللقارئ الآن أن يعمل على التحقق بنفسه ـ أو بالقبول كذلك عن ثقة ـ أن لدينا فعلاً:

$$(\mathbf{Am})\ \mathbf{n} = \mathbf{m} + \mathbf{n} \qquad (\mathbf{Mm})\ \mathbf{n} = \mathbf{m} + \mathbf{n} \qquad (\mathbf{Pm})\ \mathbf{n} = \mathbf{n}^{\mathbf{m}}$$

حيث **m** و **n** دالتان من دوال تشيرش تدلان على عددين طبيعيين، و **m + n** هو الدالة التي تشير إلى مجموعهما، وهكذا ......ولما كانت الأخيرة من هذه الدوال هي الأكثر إثارة للاستغراب، لذلك دعونا نتحقق منها في حالة: **m=2** و **n=3**

$$(P2\ )3 = ((\lambda f g.[fg|)\ 2\ )\ 3 = (\lambda g.[\ 2\ g|)\ 3$$
$$= (\lambda g.[\lambda fx.[f(fx)|g|)\ 3 = \lambda gx.[g(gx)|\ 3$$
$$= \lambda x.[\ 3\,(3\ x)| = \lambda x.[\lambda fy.[f(f(fy))|(3\ x)|$$
$$= \lambda xy.[(\ 3\,x)((\ 3\,x)((\ 3\,x)y))|$$
$$= \lambda xy.[(\ 3\,x)((\ 3\,x)(x(x(xy))))|$$
$$= \lambda xy.[(3\ x)(x(x(x(x(x(xy))))))|$$
$$= \lambda xy.[x(x(x(x(x(x(x(x(xy))))))))| = 9 = 3^2$$

على أن عمليتي الطرح والقسمة لا تعرفان بمثل هذه السهولة (بل نحتاج في الواقع لإصطلاح معين بشأن ما يجب أن نفعله في **m−n** حين تكون **m** أصغر من **n** وكذلك في **m ÷ n** حـين لا تقبل **m** القسمة على **n**). وفي أوائل الثلاثينات ظهرت نقطة تحول كبـيرة حـول هـذا الموضـوع حين اكتشف كلين Kleene كيف يتم التعبير عن الطرح في مخطط تشيرش! ثم تلت ذلك عـدة عمليات. وأخيراً أثبت تشيرش وتورنغ عام 1937، كل منهما على حده، أن كل عملية حسوبة (أو خوارزمية) مهما كانت ـ وبالمعنى المقصود الآن في آلات تورنغ ـ يمكن انجازها بأحد تعابير تشيرش (والعكس بالعكس).

إنها حقيقة تلفت النظر وتعمل على تأكيد الهدف الأساسي والطبيعة الرياضية في مفهوم الحسوبية. وقد يبدو للوهلة الأولى أن ليس لمفهوم تشيرش عن الحسوبية سوى شأن بسيط جداً في الآلات الحاسبة. إلا أن له مع ذلك بعض الصلات الأساسية بصنعة الحساب العملية. ولا سيما أن لغة الحاسوب القوية المرنة LISP تجسد بطريقة أصيلة بنية حساب تشيرش الأساسية.

وما عرفناه عن مفاهيم الحسوبية ليس كل شيء. بل إن هناك، كما سبق لي أن أشرت، طرقاً أخرى لتعريف هذا المفهوم. هناك مثلاً مفهوم بوست Post للالة الحاسبة، فهذا المفهوم كان قريباً جداً من مفهوم تورنغ، وقد استحدث في الوقت نفسه وبمعزل عنه. وكان هناك تعريف شائع للحسوبية وأيسر أيضاً للاستعمال (وهو التكرارية). وقد وجده هيربراند **J.Herbrand** وغودل. وفي عام 1929 كان لدى كرّي **H.B Curry** وكذلك لدى شونفينكل **M.Schonfinkel** في وقت سابق (عام **1924**) محاولة أخرى في هذا المضمار، وقد طُوِّر منها إلى حد ما حساب تشيرش (انظر **Gandy 1988**). وتوجد أيضاً محاولات أحدث للحسوبية (***مثل محاولة الآلة ذات السجل اللامحدود*** التي ورد وصفها في كتاب (**Cutland 1980**)، وهذه المحاولات تختلف بجزئياتها عن محاولة تورنغ الأصلية، ولكنها عملية أكثر منها. ومهما يكن من أمر فإن ***مفهوم*** الحسوبية يظل هو نفسه مهما كانت المحاولة التي نتبناها.

يبدو أن لفكرة الحسوبية، مثل العديد من الأفكار الرياضية، ولا سيما الأساسية منها والأكثر تأصلاً بجماليتها، نوعاً من **الواقعية الأفلاطونية** الخاصة بها. وهذه المسألة الغامضة الكامنة بوجه عام في الواقعية الأفلاطونية للمفاهيم الرياضية، هي ما يجب أن نعود إليه في الفصلين التاليين.

الملاحظات

1 - إني أتبنى هنا الاصطلاح الحديث المألوف الذي يضع الصفر بين « الأعداد الطبيعية».

2 - توجد عدة طرق أخرى لترميز أزواج الأعداد، وثلاثيات الأعداد........ إلخ، ولمعاملتها معاملة الأعداد المفردة. والرياضيون يعرفونها على أحسن وجه. ولكنها لاتناسب أغراضنا. فمثلاً الدستور $(1/2)\{(a+b)^2 + 3a + b\}$ يمثل زوج الأعداد الطبيعية (a,b) كعدد مفرد. يمكن للقارئ أن يجرب ذلك (فمثلاً الزوج (2, 4) يمثله العدد $(1/2)\{(2+4)^2 + 3\times2+4\}=23$).

3 - لم أزعج نفسي فيما سبق لوضع إشارة تدل على بدء تعاقب الأعداد (أو الأوامر ....إلخ). وهذا ليس ضرورياً للمدخلات، لأن هذه الأخيرة تبدأ عندما نصادف أول 1. على أن هذه الإشارة قد تكون ضرورية للمخرجات، لأننا لا يمكن أن نعرف مسبقاً إلى أي مدى يجب أن نذهب بعيداً لكي نتوصل إلى أول 1 (أعني الموجود في اليسار). ومع ذلك قد نصادف متتالية من الأصفار ممتدة بعيداً إلى اليسار. وهذا لن يكفل لنا بأنه ليس ثمة 1 لا يزال ***أبعد*** من ذلك إلى اليسار. وهنا يمكن أن نتبنى وجهات نظر مختلفة حول ذلك. إحداها هي أن نستعمل دائماً إشارة خاصة (وليكن رمزها مثلاً، في النهج المختصر) لكي تشير إلى بدء المخرجات بكاملها. ولكنني سآخذ في شرحي وجهة نظر مختلفة بقصد التبسيط، أعني أننا «نعرف» دائماً كم لاقت الأداة من الشريط فعلاً (يمكن أن نتصور مثلاً أن الأداة تترك «أثراً» من نوع ما على الشريط) فليس علينا إذن، مبدئياً، أن نفحص مقداراً لا نهاية له من الشريط لكي نتأكد بأننا راقبنا المخرجات بأكملها.

4 - إن إحدى الطرق لترميز معلومات شريطين على شريط ثالث واحد هي أن نأتي بشريط ثالث يتوسط بين السابقين. بمعنى أن الإشارات التي أرقامها عليه زوجية يمكن أن تمثل إشارات الشريط الأول، والإشارات التي أرقامها فردية تمثل إشاراتُ الشريط الثاني. ويمكن أن تطبق طريقة مشابهة في حال ثلاثة أشرطة أو أكثر. وينشأ ضعف مردودية هذا الإجراء من كون الأداة القارئة ستضطر للحركة على طول الشريط إلى الخلف وإلى الأمام تاركة عليه مؤشرات لكي تحفظ أثر المكان الذي هي فيه في حالة الأقسام الفردية والزوجية من الشريط على السواء.

5 - لا ينطبق هذا النهج إلا على الطريقة التي يمكن أن نؤول بها شريطاً معلماً بأنه عدد طبيعي. ولا يبدل شيئاً في أرقام آلات تورنغ الخاصة مثل EUC «أو عدد ثنائي + 1.»(XN + 1)

6 - إذا لم تكن T_n مختصة حقاً، عندئذ تعمل U كأن العدد المتخذ بأنه n قد انتهى حالما انتهت المتتالية الأولى، أو أن U وصلت في عبارة n الثنائية إلى متتالية وحدان عددها أكثر من

أربعة. وستقرأ باقي العبارة باعتباره جزء الشريط المتخذ بأنه **m**. وهكذا ستعمل على إنجـاز حساب لا معنى له ! ويمكننا، إذا شئنا، حذف هذه السمة، بأن نتخذ التدابير للتعبير عـن **n** بالتدوين الثنائي الموسع. وقد قررت ألا ألجأ إلى ذلك لكي لا أضيف في عرضي لآلة تورنـغ العامة *U*، التي حملناها الكثير، تعقيدات جديدة، فوق التي حملتها.

7 - إني أدين بالفضل للسيد د. دوتش David Deutsch لاشتقاقه الصيغة العشـرية [الـتي سبق عرضها] من العرض العشري الممثل للعدد **u** الذي وجدته (والمـدون أدنـاه). وأنـا ممـتن لـه أيضاً لتدقيقه بأن هذه القيمة الثنائية تعطي في الواقع آلة تورنغ عامة. والتدوين الثنائي للعدد **u** هو في الواقع:

10000000010111010011010001001010101101000110100010100000110101001101000101
0100101101000011010001010010101101001001110100101001001011101010001110101 0
1001001010111010101001101000101000101011010000011010010000010101101000100 1
11010010100001010111010010001110100101010000101110100101001101000010000111
01010000111010100001001001110100010101011010100101011010000011010101001011
01001001000110100000000110100000011101010010101010111010000100111010010101
01010101011101000010101011101000010100010111010001010011010010000101001101
00101001001101001000101101010001011101001001010111010010100011101010010100
10011101010101000011010010101010111010100100010110101000010110101000100110
1010101010001011010010101001001011010100100101110101010010101110101001010 0
11010101000011101000100100101011101010100101011101010100000111010100100000
11010101010010111010100101011010001001000111010000000111010010100101010101
11010010100100101011101000001010111010000100011101000001010100111010000101
00111010000001000101110100010000111010000100101001110100010000101101000101 0
01011101000101001011010010000001011010001010100100110100010101010111010010 0
00011101001001010101011101010101001101001000101011010010010010110100000001
01101000001000110100000100101101000000000110100101000101110100101010001101
00101001010110100000100111010010101001011010010011101010000000101011101010 0
00001101010100010101011010010101011010100001010111010100100101011101010001
00101101010010000101110100000011101010010001011010100101001101010100010111
01010010100101110101010000001011101010100000101110100000011101010100001010 1
11010010101011010101000010111010100010101011101010100100101110101010100001
11010100000001110100100100001101001001000101101010101010011101000000001011
01001000011010101010100101110100100001101001000101010111010000100011101000
10000111010000110100000000101101000001001011101010100101010110100010001001 0
11101000001001110101010011010000010101011010000100001110100100001000111010
10101010100111010000100100111010001001000011101000010100101101000010100001
11010101010101011101000100100110100010010010101001010010111010001000101 01
11010000000111010001001001011101001101001001000010110101010100110100010100
01011101000011010100001000101101010011010101001010010110101010011010010010
10111010011010010000010110100010101010001110100100001010110100000001001101 0
01000100101110100100001101010000010010111010010010100110100100101010110100
11010010010100101101001101001010000010110100100000111010100100110101010100

00101110100101000010111010010101010111010100010010110100100111010010101000
1011101000100111010100001011010010011101001010101010111010010001110100101010
10100101110100100011101010000010101011100110101000001011010010011101010000
00101110100101101010000010101101001010010111010100001001011101000011010100
01000010110101001101010001000101101010101001011101010001010010110100010101
0101110100100001010110101000101110101001001010101110101010010010111010100
111010100011101010010010010111010100011101010010100010111010100010111010100
00010010111010100011101000101000101110100101001011101010010101001011101001
01010101010110101000010101010110100001001110100001010101010111010101000101
01110101010001010111010000001110101010001001011101000000111010101001000101
11010100000011010100001011010000001110100100000010111010100011101010010001
01011101010011010101010001010110100000110101010100101010110100000010011010
10101001001110101001101010101001001011010100110100100100111010000011010101
01010010101101010001001101000101001010101110100000110101010101010010110100
01000111010001010101010101101000100011101000010101110100010010000111010011
01000000010011101000000100101110100010001010011101000000100101110100101010
10100101101000010101010111010001001010010111010000010001011101010100101101
00010001001110100000100101011101000000101010110100001000111001111010000100
00011101000010010011101000001010010111010000010100101101000010001010111010
00010001001101000100001110101111010000100100101110100001001001011101000000
01010111010000101010001101000100101110100001000001110100001001110100010000
01011101010100101101000100000101110100001010101011101000000101010111010001
00001010111010001000010101110100100000111010100100100110100000010101110100
01000100101110101010000111010100101011010010101010000110100000101001101000
00001110100000100100111010010110100100010100101101010100110100010100100101
101010100110100010101000101100110101001001011101010100110100010101010101110
01101010001010101100110100100010101010111010001000111010010010101010101101
00101001010001101001000000101110100000110101010010101010110100101010110100
10001000101110100010101011010100000101011010001000001101001000101011010000
1001110101001010101010111010010110100100100010101100110100100100101010111110
10011010010010010101101001011010010010010010110100101101001001010001011001
10100100101001010111010001010111010010010111001101001001010100101110011010
01010001010101110100010001110100001010010110100101000101110100101000101011
01000100111010010100010010111010001001110100101001000101110011010010001000
111010001001110100101001010101110011010010100000111001101010101010110100000
00011101001010100101010111010010001110100101010010101110011010000101001001
10011010100000110100000001110100101010100101011100110101000100001101000000
011101000100101010101110100010001110101010101010101101000010011101001000
10010101110100101010001001101010000000101101001001110101000010101110100100
00110101000000010110100100011101010010010111010000110101000010101011010100
01011101010000101001011101010001011101010001010101011100110101000101011010
0001101010001001010

كان من الممكن تخفيض قيمة u ليكون لآلة تورنغ تخصص مختلف. فمثلاً كان من الممكن أن نستغني عن أمر STOP ونتبنى بدلاً منه قاعدة مفادها أن الدالة تقف في المكان الذي تعود فيه الحالة الداخلية o للدخول بعد أن تكون قد مرت بحالة داخلية أخرى. ولكن هذا لن يوفر كثيراً (هذا إذا وفر أي شيء على الاطلاق). وكنا سنربح كثيراً فيما لو سمحنا للشريط بأن يحمل علامات غير 0 و1 فقط. ولقد ورد بالفعل في أدبيات آلات تورنغ العامة الكثير عن وصف آلات من هذا النوع ذات مظهر مختصر، ولكن الاختصار خداع، لاعتماده على شفرة معقدة أكثر من اللازم في أوصاف آلات تورنغ بوجه عام.

8 - كل من يريد دراسة غير تقنية للمواضيع المرتبطة بهذا «القول الجازم» يمكنه أن يراجع (1988 Delvin).

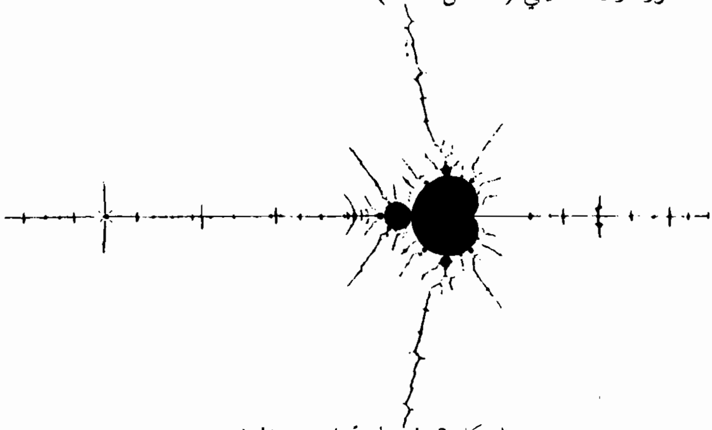
9 - يمكننا طبعاً أن نتفوق أيضاً على هذه الخوارزمية المحسنة، بأن نكتفي بتطبيق النهج السابق برمته مرة ثانية. وعندئذ يمكن أن نستخدم هذه المعرفة الجديدة لتحسين خوارزميتنا أكثر أيضاً مما كان. ولكن يمكن أن نتفوق على هذا أيضاً وهكذا. إن نوع الاعتبار الذي يقودنا إليه هذا النهج المعاود سيكون موضع دراسة مرتبطة بنظرية غودل. في الفصل الرابع أنظر ص 147.

الفصل الثالث

الرياضيات و الواقــع

أرض «تور- بْلِد - نام»

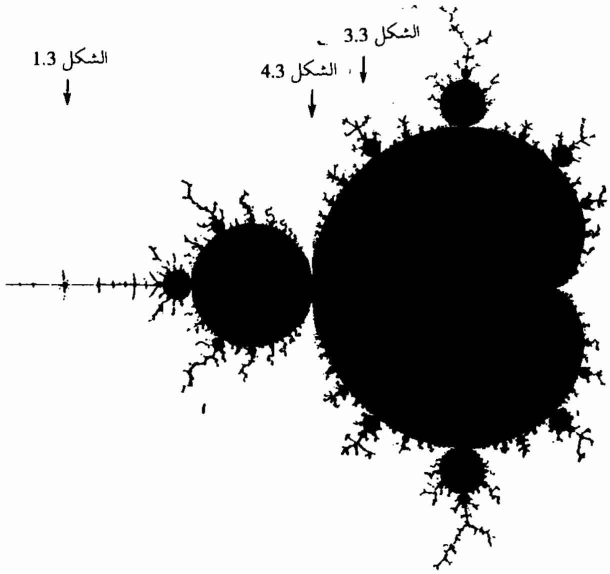
لنتصور أننا كنا مسافرين في رحلة طويلة إلى عالم ناء جداً سندعوه عالم تور ــ بْلِد ــ نام، و أن آلة الاستشعار عن بعد قد التقطت إشارة معروضة الآن أمامنا على الشاشة . و بعد أن اتضحت الصورة رأينا ما يلي (الشكل 3 ــ1):



الشكل 3 -1 : لمحة أولى عن عالم غريب

ترى ماذا يمكن أن يكون هذا ؟ هل هو حشرة لها مظهر غريب ؟ أم ربما بحيرة داكنة تصب فيها جداول جبلية. أو يمكن أن تكون مدينة مجهولة غريبة التكوين، و طرقات تذهب في اتجاهات مختلفة نحو مدن صغيرة و قرى قريبة ؟ . أو قد تكون جزيرة ــ و عندئذ دعونا نحاول معرفة إن كانت هناك قارة قريبة منها . و يمكن أن نقوم بذلك" بإبعاد " آلة الاستشعار و إنقاص تكبيرها خمس عشرة مرة تقريبا . و الآن أنظر هاهو العالم بأسره أمام ناظريك (في الشكل 3 ــ 2):

تبدو جزيرتنا في الشكل 3 - 2 مثل نقطة صغيرة مشار إليها بسهم كتب فوقه " الشكل 3 - 1 " و جميع الاستطالات الخارجة من الجزيرة الأصلية (من جداول و طرقات وجسور ؟؟) كلها تنتهي في مكان معين ، ما عدا الاستطالة المتصلة بتجويف شقها الأيمن، و المتصلة من طرفها الآخر بالشيء الأضخم بكثير الذي نراه مرسوماً في الشكل 3 ــ 2.

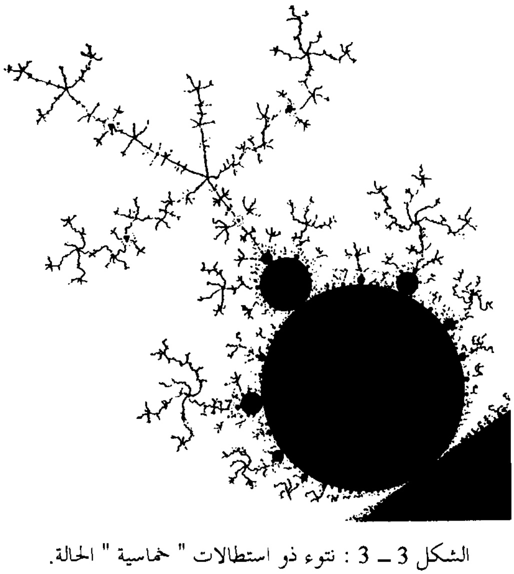


الشكل 3 ـ 2 : تور بلد ــ نام بأسرها. وقد وضحنا فيهــا مواضع الأقسام المكبره في الأشكال 3 ـ 1 و 3 ـ 3 و 3 ـ 4 بأن أشرنا إليها بأسهم فوقها.

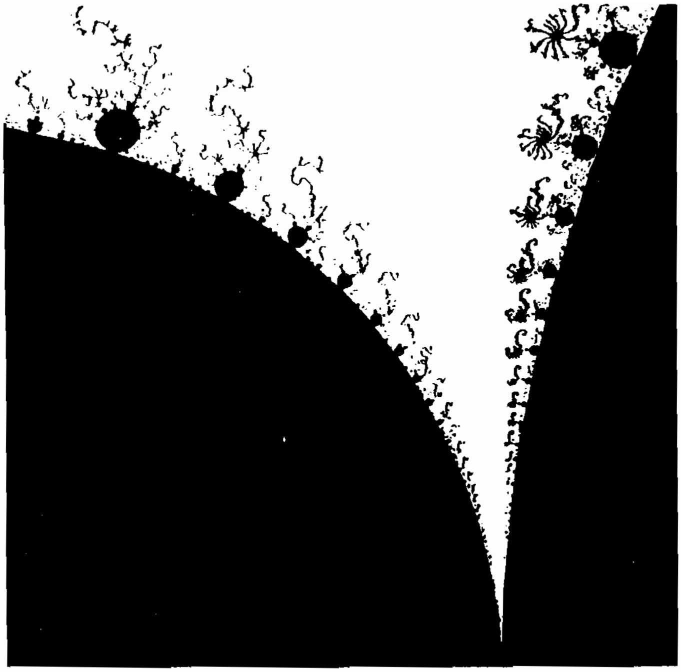
ويتضح من الشكل أن هذا الشيء الأضخم يشبه الجزيرة التي رأيناها أول الأمر ــ على الرغم من أنه ليس مثله بدقة. وإذا ركزنا النظر بإحكام أكثر على الموضع الذي يبدو أنه هو الحد الفاصل لهذا الشيء ، نرى نتوءات لا حصر لها ــ وهي مستديرة إلى حد ما ، و لكن لها هي أيضا نتوءات شبيهة بها . و كل نتوء صغير ، يبدو متصلاً بنتوء أضخم منه في مكان دقيق ، مولّداً العديد من النتوءات فوق النتوءات . وحين تصبح الصورة أوضح، نرى الآلاف من الاستطالات الضئيلة منبثقة من البنية. كما أن الاستطالات نفسها متشعبة في مواضع مختلفة، و غالباً ما تكون كثيرة التعرجات . و يتراءى لنا أننا نرى في بعض البقع على الاستطالات عقداً صغيرة معقدة، لا يمكن لآلة الاستشعار التي نحملها أن تفصلها بقوة تكبيرها الحالية. ومن الواضح أن الشيء الذي رأيناه، لا هو في الحقيقة جزيرة أو قارة و لا هو منظر طبيعي ريفي من أي نوع. بل ربما كان ما نراه في النهاية هو نوع من الخنفساء العملاقة، والأولى التي رأيناها كانت إحدى ذراريها التي لا تزال مرتبطة بها بنوع من الحبل السري في شكل استطالة .

لنحاول أن نفحص طبيعة واحد من نتوءات مخلوقنا بأن نزيد قوة تكبير آلة الاستشعار عشر مرات تقريباً (الشكل 3 ـ 3) و هو في موضع النتوء المشار إليه في الشكل 3 ــ 2 بسهم كتب فوقه " الشكل 3 ــ 3 " . إن النتوء نفسه يشبه المخلوق بمجمله شبها قويا ــ ما عدا فقط نقطة الارتباط. و لنلاحظ وجود مواضع مختلفة في الشكل 3 ــ 3 تأتي إليها خمس استطالات معاً.

فلربما كان هناك " حالة الخمس " استطالات في هذا النتوء الخاص (مثلما يمكن أن نقول إن هناك " حالة الثلاث " استطالات في أعلى نتوء). و لو فحصنا في الواقع النتوء التالي الأصغر حجما الواقع إلى الأسفل و إلى اليسار قليلا في الشكل 3 ــ 2 ، لوجدنا " حالة السبع ، و في الذي يليه " حالة التسع " و هكذا. و حين ندخل في الشق بين أكبر منطقتين من الشكل 3 ــ 2 نجد عن يميننا نتوءات تتميز بأعداد فردية تزداد في كل مرة اثنان . دعونا نحدق عميقا في أسفل الشق، و نزيد قوة التكبير عن قوتها في الشكل 3 ــ 2 بمعامل يقرب من عشرة (الشكل 3 ــ 4) فنرى المزيد من النتوءات الصغيرة الكثيرة العدد و الكثير من الالتفافات . كما يمكن أن نتبين بالجهد عن اليمين بعض " ذيول أحصنة البحر " الحلزونية الصغيرة ــ و ذلك في منطقة سنعرفها باسم " وادي أحصنة البحر ". و إذا زيدت قوة التكبير إلى الحد الكافي، سنجد في هذا المكان " شقائق بحر " متنوعة أو مناطق يتضح منها مظهرها المزهر. فلربما كان هذا في النهاية، نوعاً من الشاطىء الغريب فعلا ــ أو قد يكون حيداً مرجانيا يضج بالحياة من كل نوع. ثم يتضح ، بعد مزيد من التكبير، أن ما أمكن أن يظهر بمظهر الزهر ، إنما هو مكون من آلاف البنى الضئيلة التي لا يصدق تعقيدها، و لكل منها العديد من الاستطالات و الذيول الحلزونية الملتفة. دعونا نفحص بشيء من التفصيل أحد ذيول أحصنة البحر الكبيرة ، أعني ذاك المتميز في المكان المشار إليه بعبارة " الشكل 3 ــ 5 " في الشكل 3 ــ 4 (و هو المتصل بنتوء توجد فيه " حالة الـ 29 " استطالة). فبعد مزيد من التكبير يقرب من 250 مرة ، نصبح أمام الحلزون المرسوم في الشكل 3 ــ 5 ، و سنجد أن هذا الذيل ليس عادياً، و إنما هو نفسه مكون من مزيد من الالتواءات المعقدة إلى الأمام و الخلف مع الحلزونات الضئيلة التي لا تحصى و مناطق تشبه الأخطبوطات و أحصنة البحر .



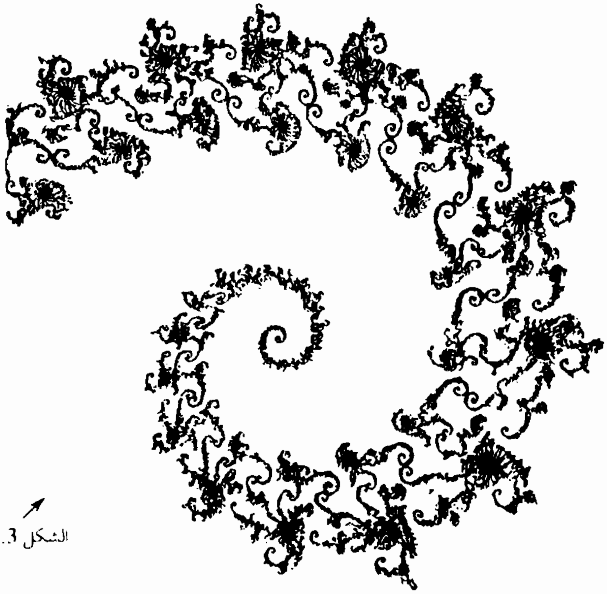
الشكل 3 ــ 3 : نتوء ذو استطالات " خماسية " الحالة.



الشكل 3 ــ 4 : الشق الرئيسي الذي يمكن أن نرى فيه " وادي أحصنة البحر " في الجانب الأيمن المنخفض.

إن بنية هذا الذيل متماسكة فقط في الأماكن التي يتلامس فيها حلزونان أحدهما مع الآخر. فدعونا نتحرى أحد هذه الأماكن (المشار إليه في الشكل 3 ــ 5 بعبارة " الشكل 3 ــ 6 ") بعد زيادة التكبير بمعامل يقرب من ثلاثين . والآن لنلاحظ : هل نرى في الوسط شيئا غريبا غدا الآن مألوفاً ؟ . إن زيادة التكبير بمعامل يقرب من ست مرات (الشكل 3 ــ 7)، سيكشف وجود ابن مخلوق صغير. و هذا الابن يكاد يطابق البنية التي فحصناها بكاملها!. و إذا نظرنا إليه من قريب، نرى أن الاستطالات المنبثقة منه تختلف قليلا عن استطالات البنية الرئيسية، و أنها تلتف و تمتد إلى مسافات أبعد نسبياً بكثير. و علاوة على ذلك ، يكاد لا يختلف المخلوق الصغير عن والده مطلقاً، حتى أنه يمتلك مثل والده ذرية خاصة به، و في أماكن مقابلة للسابقة بكل إحكام . و هذا ما نستطيع أن نتحراه أيضا فيما لو زدنا ثانية قوة التكبير . كما أن الأحفاد سيشابهون سلفهم المشترك ــ و ليس من الصعب أن يتخيل المرء أن هذا الأمر سيستمر إلى ما لا نهاية . و لكن يمكننا المثابرة بقدر ما نريد على استكشاف هذا العالم الغريب (تور بلد ــ نام) مع تعديل دائم في قوة تكبير آلة الاستشعار إلى درجة أعلى فأعلى، فنجد تنوعاً لا ينتهي ، و أنه لا وجود لمنطقتين متشابهتين بكل دقة ــ إلا أن هناك سمة عامة سرعان ما نألفها ، و أن هذه المخلوقات الشبيهة بالخنافس تظل تنبثق في المستويات

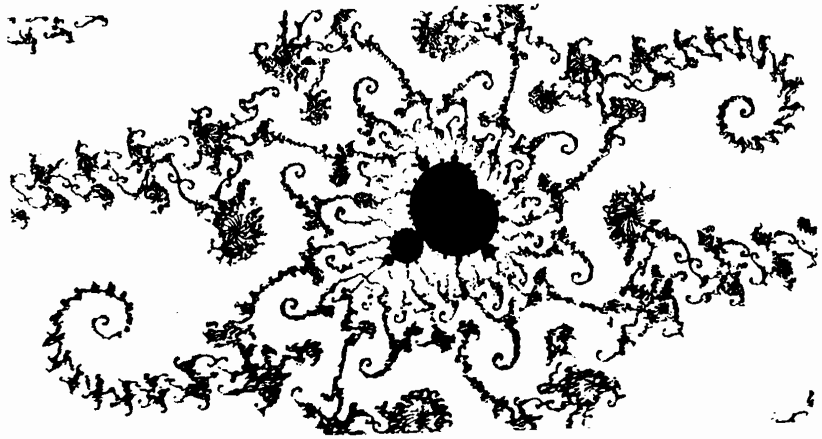
الأصغر فالأصغر . وفي كل مرة ، تختلف بنى الاستطالات المحيطة بها عما كما نـراه في السـابق و تظهر لنا بمظهر ساحر جديد و بتعقيد لا يصدق.



الشكل 3 ــ 5 : صورة مكبرة لذيل حصان البحر



الشكل 3 ــ 6 : صورة مكبرة أكثر لنقطة الاتصال التي يصل إليها حلزونان معاً، ويرى في المركز تماماً مولود صغير



الشكل 3 ـ 7 : بعد التكبير، يبدو المولود مشابهاً بإحكام للعالم بأسره

ترى ما هذه الأرض الغريبة المتنوعة التي يفوق تعقيدها العجيب كل تعقيد، و التي وقعنا عليها ؟ لا شك أن كثيراً من القراء سيعرفون حالاً، و لكن بعضهم لن يعرف، بأن هذا العالم ليس سوى عينة من الرياضيات المجردة، و هي مجموعة المنحنيات المعروفة باسم مجموعة مندلبروت Mandelbrot (1) المعقدة قطعاً. و لكن قاعدة توليدها سهلة بصورة غريبة. و لكي أشرح هذه القاعدة شرحاً ملائماً، لابد لي في البدء من ايضاح المقصود من **عدد عقدي Complex number**. وهذا أمر يسير سأقوم به هنا لأننا سنحتاج للأعداد العقدية فيما بعد. فهي قطعا أساسية في بنية ميكانيك الكم . و هي لذلك في أساس مكونات العالم الحقيقي نفسه الذي نعيش فيه. كما أنها إحدى معجزات الرياضيات الكبيرة. و لابد لي، لإيضاح المقصود من عدد عقدي، من تذكير القارىء في البدء بماذا تعني عبارة " عدد حقيقي." كما أن من المفيد أيضا أن نشير إلى العلاقة بين هذا المفهوم ، و واقعية " العالم الحقيقي " ذاتها.

الأعداد الحقيقية

يذكر القارىء أن الأعداد **الطبيعية** هي الكميات الكاملة:

0 , 1 , 2 , 3 , 4 , 5 , 6 , 7 , 8 , 9 , 10 , 11 , ...

وهذه الأعداد هي أول (أو أبسط) مختلف أنواع الأعداد ، و هي الأساس لها كلها، و بها نستطيع إعطاء تقدير كمي لأي كيان من النمط المنفصل. فيمكن مثلا الحديث عن سبعة و عشرين خروفا في الحقل , أو عن وميضين مضيئين ، أو إثنتي عشرة ليلة ، أو ألف كلمة ، أو أربع محادثات، أو صفر من الأفكار، أو غلطة واحدة ، أو عن ستة متغيبين ، أو تغيرين في

الاتجاه ... إلخ. و يمكن جمع الأعداد الطبيعية أو ضربها معاً لكي تنتج أعدادا طبيعية جديدة. وقد كانت هي الأشياء التي تناولتها دراستنا للخوارزميات كما رأينا في الفصل السابق.

و مع ذلك يمكن لبعض العمليات الهامة أن تقودنا إلى خارج مجال الأعداد الطبيعية، وأبسط هذه العمليات، الطرح، و لكي نعرف الطرح تعريفا نظاميا ، نحتاج إلى الأعداد **السالبة**. و لتحقيق هذا الغرض ، يمكن أن نستعرض منظومة الأعداد **الصحيحة** كلها:

..... -6 , -5 , -4 , -3 , -2 , - 1 , 0 , 1 , 2 , 3 , 4 , 5 , 6 , 7 , ...

فبعض الأشياء ، مثل الشحنة الكهربائية ، أو الأرصدة المصرفية ، أو التواريخ * ،يعبر عنها كميا بأعداد كهذه. ولا تزال هذه الأعداد مع ذلك محدودة أيضا في أفقها . إذ قد يصيبنا الفشل حين نحاول **تقسيم** أحد هذه الأعداد على عدد آخر . لذلك سنحتاج إلى **الكسور** أو كما يسمونها **الأعداد الناطقة rational number:**

0 , 1 , -1 , 1/2 , -1/2 , 2 , -2 , 3/2 , -3/2 .....

إن هذه الأعداد ، تكفي لإجراء عمليات حسابية منتهية . و لكننا نحتاج في الكثير جداً من الأغراض الهامة إلى المضي أبعد من ذلك و تناول عمليات لا نهائية أو محدودة ؟ . فالكمية المألوفة π مثلاً - و هي من الكميات الهامة جداً في الرياضيات - تظهر معنا في العديد من مثل هذه العبارات غير المنتهية ، التي نخص بالذكر منها:

$$\pi = 2 \{ (2/1)(2/3)(4/3)(4/5)(6/5)(6/7) ......\}$$

و كذلك:

$$\pi = 4 (1 - 1/3 + 1/5 - 1/7 + 1/9 - 1/11 + ...)$$

(وهاتان عبارتان شهيرتان للعدد π . وقد وجد أولاهما، الرياضي الإنجليزي و النحوي و خبير رموز التعمية جون واليس John Wallisفي عام 1655 . و وجد الثانية الرياضي و الفلكي الاسكتلندي (و مخترع أول مرقاب عاكس) جمس غريغوري James Gregory في عام 1671). إن الأعداد التي تعرف بهذه الطريقة، مثل العدد π، ليس من الضروري أن تكون أعداداً ناطقة (أعني أنها قد لا تكون من الشكل n/m حيث n و m عددان صحيحان و m لا يساوي الصفر). فلابد من **توسيع منظومة** الأعداد لكي تشمل كميات من هذا القبيل .

تسمى هذه المنظومة من الأعداد منظومة "الأعداد الحقيقية" "real numbers" - و هي تلك الأعداد التي تمثل بمنشور عشري غير منته ، مثل:

- 583 , 70264439121009538......

* إن المصطلحات التاريخية ، في الواقع ، لا تساير هذا النوع من الأعداد بكل معنى الكلمة ، لأن السنة 0 لا وجود لها.

ولدينا من مثل هذا التمثيل عبارة π الشهيرة:

$$\pi = 3,14159265358979323846.....$$

ومن النماذج العددية التي يمكن تمثيلها بهذه الطريقة ، الجذور التربيعية (أو الجذور التكعيبية أو الجذور من المرتبة الرابعة إلخ) لأعداد ناطقة موجبة . مثل:

$$\sqrt{2} = 1,41421356237309504......$$

أو في الحقيقة الجذر التربيعي (أو التكعيبي ...) لأي عدد حقيقي موجب . كما هو في عبارة π التي وجدها الرياضي السويسري العظيم ليونارد أويلر : **Leonard Euler**:

$$\pi = \sqrt{\quad} \{ 6 (1+1/4+1/9+1/16+1/25+1/36+..... \}$$

إن الأعداد الحقيقية، في الواقع ، هي نوع مألوف من الأعداد التي نضطر للتعامل معها في حياتنا اليومية ، على الرغم من أن ما يعنينا منها هو قيمها التقريبية فقط، و نسر عند العمل بمنشوراتها التي لا تتضمن سوى عدد صغير من الأرقام العشرية. أما في الإفادات الرياضية ، فقد تحتاج الأعداد الحقيقية إلى التحديد بكل دقة ، فنبحث عن نوع من التعبير غير المنتهي، مثل المنشور العشري الكامل غير المنتهي ، أو ربما نبحث عن تعبير رياضي آخر غير منته مثل الدساتير المذكورة سابقاً للعدد π التي أعطاها و اليس و غريغوري و أويلر. (أما في هذا الكتاب فسأستعمل عادة المنشورات العشرية في شروحي، و هذا فحسب لأن ذلك هو المألوف أكثر من غيره، أما بالنسبة للرياضيين فهناك طرق أخرى لعرض الأعداد الحقيقة ترضيهم أكثر، و لكن لا حاجة لأن نهتم لذلك هنا) .

وقد يظن المرء أنه من المستحيل أن يتأمل في منشور لا نهائي **بأكمله**. و لكن الواقع غير ذلك، ففي المثال البسيط التالي يمكن أن نجعل التعاقب بأكمله، بكل وضوح ، موضعاً للتفكير:

$$1/3 = 0,33333333....$$

(حيث تشير النقاط إلى أن تتالي الثلاثات يستمر إلى ما لانهاية). فكل ما نحتاجه إذن للتأمل فيه هو معرفة أن تتالي الثلاثات فيه يستمر على هذا النحو إلى ما لا نهاية . و لكل عدد ناطق [بوجه عام] منشور عشري مكرر (أو منته)، مثل العدد:

$$93/74=1,25675675675675675......$$

حيث التعاقب 567 يتكرر إلى ما لا نهاية، فهذا أيضا عدد يمكن التأمل فيه بأكمله. كما أن العبارة :

$$0,220002222000000222222000000002222222220.....$$

التي تعرف عدداً **غير ناطق**، هي أيضاً يمكن التأمل فيها بأكملها (حيث متتالية الأصفار، و كذلك الإثنينات، يزداد طولها اثنين في كل مرة) و يمكن إعطاء العديد من الأمثلة المشابهة لهذا المثال. و الحقيقة أننا في كل حالة كهذه نكتفي بأن نعرف فيها الطريقة التي يتم النشر وفقها. و

إذا وجدت خوارزمية تولد الأرقام بالتتالي، وعرفنا هذه الخوارزمية، تصبح لدينا عندئذ طريقة للتأمل في المنشور العشري اللانهائي بأكمله. و عندئذ نسمي هذا العدد الحقيقي الذي نستطيع توليد منشوره بخورازمية معروفة، عدداً ***حسوباً*** (أنظر أيضاً ص 80) (ولا فرق في ذلك أكان العدد مدونا بالتعداد العشري أو بأي تعداد آخر، كالثنائي مثلاً. فالأعداد " الحسوبة " بهذا المعنى هي نفسها الحسوبة بأي أساس آخر يستخدم لنشرها). والأعداد الحقيقية مثل π و $\sqrt{2}$، التي اتخذناها منذ قليل أمثلة، هي أيضاً أعداد حسوبة. و قد يكون ذكر القاعدة في كل مرة معقد التفاصيل ، إلا أنه، مبدئياً، ليس متعذراً .

ومع ذلك، توجد أيضاً أعداد حقيقية كثيرة ***ليست*** حسوبة بهذا المعنى. ففي الفصل السابق، رأينا أن هناك تعاقبات رقمية غير حسوبة على الرغم من أنها معرفة بكل إتقان . و يمكن أن نأخذ مثالاً عنها، المنشور العشري الذي يكون رقمه النوني1 إذا توقفت آلة تورنغ النونية التي تقوم بعملها على العدد n ، و o إذا لم تتوقف[†]. فما نطلبه فقط بالنسبة لعدد حقيقي ما بوجه عام ، هو أن له قطعا منشورا عشريا لا نهائيا، نتطلب أن يكون له خوارزمية لتوليد رقمه النوني، و لا حتى أن علينا أن نعرف أي نوع من القواعد التي تعين مبدئياً ما هو رقمه النوني (2). إن من العسير جداً العمل في الأعداد الحسوبة، إذ لا يمكننا أن نجعل جميع عملياتنا حسوبة، حتى حين نقصر عملنا على أعداد حسوبة. فإذا أردنا مثلا أن نقرر بشأن عددين حسوبين هل يساوي أحدهما الآخر أم لا ، فإن هذا التقرير ليس مسألة حسوبة . لذلك نفضل لأسباب من هذا النوع أن نتعامل بدلاً من ذلك بجميع الأعداد الحقيقية التي يمكن للمنشور العشري فيها أن يكون أي شيء على الإطلاق، و لا حاجة لأن يكون مثلاً تعاقباً حسوباً فحسب.

و أخيراً يجب أن نشير إلى وجود تطابق بين عدد **حقيقي** ينتهي منشوره العشري بتتالي التسعات إلى اللانهاية و عدد عشري آخر ينتهي منشوره العشري بتتالي الأصفار إلى اللانهاية[x]. مثال ذلك:

$$- 27,1860999999..... = - 27,1861000000.....$$

[†] على الرغم من أن جميع حدود هذا العدد معرفة بدقة ، إلا أنه غير حسوب لأننا لا نملك خورازميا ينبئنا عن الحالات التي تتوقف فيها آلة تورنغ والحالات التي لا تتوقف فيها.

[x] طبعاً بشرط أن تكون الأرقام السابقة لهذين التتاليين متطابقه ما عدا الأخير بينها الذي يجب أن يزيد 1 في الثاني عن الأول .

كم عددا حقيقيا يوجد ؟

دعونا نتوقف لحظة لكي نقدر مدى اتساع التعميم الذي قمنا به عندما انتقلنا من الأعداد الناطقة إلى الأعداد الحقيقية.

قد يظن المرء لأول وهلة أن من المفروغ منه أن عدد الأعداد الصحيحة أكبر من عدد الأعداد الطبيعية ، لأن كل عدد طبيعي هو عدد صحيح ، في حين أن بعض الأعداد الصحيحة (و أعني بها السالبة) ليست أعدادا طبيعية . كما قد يظن المرء بالمثل أن عدد الكسور أكبر من عدد الأعداد الصحيحة . على أن الأمر غير ذلك ، بمعنى أن العدد الكلي للكسور و العدد الكلي للأعداد الصحيحة والعدد الكلي للأعداد الطبيعية هي كلها العدد اللانهائي ***نفسه***، الذي يشار إليه بالحرف $\aleph_0$ (يُقرأ ألف صفر).[†] وذلك، وفقاً للنظرية القوية البديعة التي وضعها في أواخر القرن التاسع عشر الرياضي الروسي ـ الألماني الفائق الأصالة جورج كانطور **Georg Cantor** (ومما يلفت النظر، أن هذا النوع من الأفكار كان قد سبق إليها جزئياً قبل ما يقرب من 250 عاماً، أي في أوائل القرن السابع العشر، الفلكي و الفيزيائي العظيم غاليليوغاليلية Galileo Galilei الذي سنذكر له في الفصل الخامس بعضا من إنجازاته الأخرى.) ويمكن للمرء أن يتأكد أن عدد الأعداد الصحيحة هو نفسه عدد الأعداد الطبيعية بأن يرتب لائحة بعلاقة واحد لواحد بين المجموعتين على النحو التالي:

الأعداد الطبيعية		الأعداد الصحيحة
0	$\leftrightarrow$	0
1	$\leftrightarrow$	−1
2	$\leftrightarrow$	1
3	$\leftrightarrow$	−2
4	$\leftrightarrow$	2
5	$\leftrightarrow$	−3
6	$\leftrightarrow$	3
7	$\leftrightarrow$	−4
.	.	.
.	.	.
.	.	.
$2n-1$	$\leftrightarrow$	$-n$
$2n$	$\leftrightarrow$	n
.	.	.
.	.	.
.	.	.

[†] هذا الحرف هو أول أحرف الأبجدية الكنعانية المكتوبة بالخط المربع و يقرأ فيها كما يقرأ أول أحرف العربية (ألف).

نلاحظ في هذه اللائحة أن كل عدد صحيح (في العمود الأيسر) و كل عدد طبيعي (في العمود الأيمن) يظهران في اللائحة مرة واحدة وواحدة فقط. أما ما يثبت في نظرية كانطور أن عدد الأشياء الموجودة إلى اليسار هو نفسه عدد الأشياء الموجودة إلى اليمين، فهو وجود مثل هذا التقابل واحد لواحد . و لذلك فإن عدد الأعداد الصحيحة هو فعلاً نفسه عدد الأعداد الطبيعية . و هذا العدد هنا، في هذه الحالة، لا نهائي. و لكن لا يهم (فالميزة الوحيدة التي تنفرد بها الأعداد اللانهائية، هي أننا نستطيع أن نتخلى عن بعض عناصر اللائحة الأولى، و نظل نجد مع ذلك علاقة واحد لواحد بين القائمتين).و بالمثل ، يمكننا أن نقيم (و لكن بطريقة أعقد بعض الشيء) علاقة و احد لواحد بين الكسور والأعداد الصحيحة.(و لتحقيق ذلك، يمكننا أن نكيف إحدى الطرق التي نمثل بها ***كل زوج*** من الأعداد، و هما هنا البسط والمقام، بعدد طبيعي وحيد[x] . انظر الفصل الثاني ص103). تسمى المجموعات التي يمكن وضعها في علاقة واحد لواحد مع الأعداد الطبيعية بالمجموعات العدودة Countable (أي القابلة للعد). فالمجموعات اللانهائية العدودة هي المجموعات التي لها $\aleph_0$ عنصراً. وقد رأينا منذ قليل أن الأعداد الصحيحة عدودة ، فالكسور هي أيضا عدودة .

ترى هل توجد مجموعات **غير** عدودة ؟ إن منظومة الأعداد التي انتقلنا بها من الأعداد الطبيعية أول الأمر إلى الأعداد الصحيحة ثم إلى الأعداد الناطقة، لم يزدد فيها في الواقع، على الرغم من هذا التوسع، عدد الأشياء الكلي التي نتعامل بها ، فقد رأينا أن عدد الأشياء عدود في كل حالة. ولربما تكوّن لدى القارىء انطباع بأن كافة المجموعات اللانهائية عدودة. ولكن لا،لأن الوضع يختلف كثيراً عندما ننتقل إلى الأعداد الحقيقية. وهذا أحد إنجازات كانطور الرائعة، فقد أثبت وجود أعداد حقيقية **أكثر** من الأعداد الناطقة. و كان استدلاله مبنياً على طريقة " الشق أو الخط القطري " التي أشرنا إليها في الفصل الثاني و التي استخدمها تورنغ بصورة مناسبة لاستدلاله الذي يثبت فيه أن مسألة توقف آلات تورنغ غير حلولة . كما يسير استدلال كانطور، مثل تورنغ، على طريقة الرد إلى استحالة : **reductio ad absurdum** إذ نفرض أن النتيجة التي نحاول إثباتها غير صحيحة، بمعنى أن مجموعة كل الأعداد الحقيقية هي مجموعة عدودة. عندئذ تكون مجموعة الأعداد الحقيقية المحصورة بين 0 و 1 هي أيضا عدوده. ويمكن إذن تنظيم لائحة تظهر تزاوج هذه الأعداد واحدا مقابل واحد، مع الأعداد الطبيعية، على النحو التالي مثلا:

---

[x] يمكن تمثيل الكسر بعدد واحد أرقامه اليمنى البسط و اليسرى المقام مثال ذلك الكسر 47 / 35 يمثله العدد 4735، وهكذا.

الأعداد الطبيعية		الأعداد الحقيقية
0	⟷	0.10357627183. . .
1	⟷	0.14329806115. . .
2	⟷	0.02166095213. . .
3	⟷	0.43005357779. . .
4	⟷	0.92550489101. . .
5	⟷	0.59210343297. . .
6	⟷	0.63667910457. . .
7	⟷	0.87050074193. . .
8	⟷	0.04311737804. . .
9	⟷	0.78635081150. . .
10	⟷	0.40916738891. . .
.	.	.
.	.	.
.	.	.

ولقد أبرزت في هذه اللائحة أرقام القطر بخط أسود عريض ، و هي:

1 , 4, 1 , 0 , 0 , 3 , 1 , 4 ......

فطريقة الشق القطري تقوم على تكوين عدد حقيقي (بين 0 و 1) يختلف كل رقم في منشوره العشري (بعد الفاصلة) عن الرقم المقابل له، من حيث الموضع، في سلسلة هذه الأرقام القطرية . و لتحديد المقصود ، لنقل مثلاً أن الرقم سيكون 1 في كل مكان يكون فيه الرقم القطري المقابل له مختلفاً عن 1، و سيكون 2 في كل مكان يكون فيه الرقم القطري 1 . و هكذا نحصل عندئذ على العدد الحقيقي:

0 , 2 1211121 ......

فهذا العدد الحقيقي لا يمكن أن يظهر في لائحتنا ، لأنه يختلف عن العدد الأول في أول أرقامه بعد الفاصلة، وسيختلف عن الثاني بثاني أرقامه بعد الفاصلة، و سيختلف عن الثالث بثالث أرقامه بعد الفاصلة و هكذا. و هذا تناقض ، لأننا افترضنا أن لائحتنا تضم **جميع** الأعداد الحقيقية بين 0 و 1. فهذا التناقض يثبت صحة ما نحاول إثباته. أعني أنه **لاوجود** لعلاقة واحد لواحد بين الأعداد الحقيقية و الأعداد الطبيعية، و أن عدد الأعداد الحقيقية أكبر في الواقع من عدد الأعداد الناطقة* ، **فهو غير** عدود.

يشار عادة إلى عدد الأعداد الحقيقية اللانهائي بالحرف C (وC تشير إلى كلمة continuum، أي الاستمرار، وهو الاسم الآخر لمنظومة الأعداد الحقيقية). و هنا قد يتساءل المرء لماذا لم يطلق على هذا العدد اسم($\aleph_1$) مثلاً. في الحقيقة إن هذا الاسم الأخير يطلق على العدد غير المنتهي الذي يلي ($\aleph_0$) و الأكبر منه مباشرة. ومن المسائل الشهيرة غير المحلولة،

* لأننا أثبتنا في الواقع أن من الممكن دائما إيجاد عدد حقيقي غير موجود في اللائحة

مسألة تقرير هل C يساوي ($\aleph_1$)، ويطلق على هـذه المسـألة فرضيـة الاسـتمرار continuum hypothesis .

و يمكن أن نشير هنا إلى أن مجموعة الأعداد **الحسوبة** ، **هـي** أيضـاً عـدودة. إذ يكفـي لكـي نعدها أن ندرج في لائحة واحدة و بحسب الترتيب الرقمي جميع آلات تورنغ التي تولـد أعـداداً حقيقية (أي التي تعطي بالتتالي أرقام أعداد حقيقية). و يحق لنا أن نحذف من اللائحة كل آلـة تولد عددا حقيقيا سبق أن ظهر قبل ذلك في اللائحة. و لما كانت آلات تورنـغ عـدودة، فلابـد أن تكون كذلك حتما الأعداد الحقيقية الحسوبة. فلماذا يا ترى لا نستطيع أن نسـتعمل طريقـة الشق القطري في هـذه اللائحـة لكـي نولـد عـدداً حسـوباً جديـداً لا يوجـد في اللائحـة ؟. إن الجواب يكمن في حقيقة أننا إذا أُعطينـا آلـة تورنـغ لا علـى التعيـين فإننـا لا نسـتطيع أن نقـرر بطريقة حسوبة، بوجه عام، أهي موجودة في اللائحـة أم لا. إذ إن فعـل ذلـك في الحقيقـة يعـني ضمنا أننا نستطيع حل مسألة التوقف . فقد تبدأ بعض آلات تورنغ بإعطاء أرقام عدد حقيقـي، ثم يرتج عليها ولا تعطي بعد ذلك أبداً رقماً آخر (لأنها " لا تتوقف ") ـ و لا توجـد وسـيلة حسوبة تقرر ما هي آلات تورنـغ الـتي ستتوه بهـذه الطريقـة . فهـذه في الأسـاس هـي مسـألة التوقف. لذلك ، على الرغم من أن الطريقة القطرية ستولد عدداً حقيقيـاً، فـإن هـذا العـدد لـن يكون حسوباً. وكان من الممكن استخدام هذه الحجة، نفسها لإثبات وجود أعداد لا حسوبة. إن برهان تورنغ الذي يثبت وجود أصناف من المسائل لا يمكن حلها خوارزمياً (كالتي رأيناهـا في الفصل السابق) يسير بدقة على نسـق هذا الاستدلال، وسنرى فيمـا بعـد تطبيقـات أخـرى لطريقة الشق القطري.

"واقعية " الأعداد الحقيقية

لقد سميت الأعداد الحقيقية " حقيقية " ، بصرف النظر عـن مفهـوم الحسـوبية ، لأنهـا تزودنـا، كما نعرف ، بالمقادير التي نحتاجها لقياس المسافات و الزوايا و الزمن و الطاقة و درجة الحرارة، والكثير من المقادير الهندسية و الفيزيائية . على أن العلاقة بين الأعداد "الحقيقية "، التي تعـرف بطريقة مجردة، والكميات الفيزيائيـة، ليسـت واضحـة المعـالم كمـا قـد يتخيـل المـرء. فـالأعداد الحقيقية تصدر عن **عمل رياضي مثـالي** و ليس عـن أي كميـة واقعيـة ملموسـة فيزيائيـاً. فمـن خواصها المميزة مثلاً أن أي عددين، مهما كانا متقاربين ، يوجد بينهما عدد ثالث. في حين أنه ليس من الواضح أبداً أن المسافات الفيزيائية أو الأزمنة يمكن أن يقال إنها تمتلك في الواقع فعـلاً تلك الخاصة. وإذا تابعنا تقسـيم مسـافة فيزيائيـة بـين نقطتـين ، فلابـد أن نصـل في النهايـة إلى مسافات صغيرة يمكن ألا يكون عندها لمفهوم المسافة **الحقيقي**، بمعناه العادي ، معنى مـا . ومـن المتوقع أن يكون هذا هو الحال عند مستوي " الثقالة الكمومية " البـالغ جـزءاً مـن 10^{20} جـزءاً

من حجم جسيم تحت ذري. و لكن لكي نعطي صورة عن الأعداد الحقيقية، يجب أن نمضي إلى مسافات أصغر من هذه بما لا يحد مثل جزء من 10^{200} أو جزء من 10^{2000} أو جزء من $10^{10^{200}}$ مثلاً من حجم الجسيم. وليس من الواضح إطلاقاً أن مثل هذا المستوي، الذي لا يدرك مدى صغره، له معنى فيزيائي ما. وهذا القول نفسه يصح بالمقابل على الفترات الزمنية الصغيرة.

لقد اختير نظام الأعداد الحقيقية في الفيزياء لفائدته **الرياضية** و بساطته و أناقته، إضافة إلى كونه يتفق على مدىواسع جداً، مع مفهومي المسافة والزمن الفيزيائيين. و لكن هذا الاختيار لم يتم بسبب كونه يتفق مع هذين المفهومين على أي مدى كان. إذ من الممكن فعلاً أن نتوقع عدم وجود مثل هذا الاتفاق في المستويات الصغيرة جداً للمسافة و الزمن. و إذا كنا قد ألفنا استخدام المساطر لقياس المسافات البسيطة، إلا أن هذه المساطر نفسها ستأخذ طبيعة حبيبية عندما نهبط إلى مستوي ذراتها. و لم يمنعنا ذلك بحد ذاته، من متابعة استخدام الأعداد الحقيقية بطريقة دقيقة، و لكن كان لابد من قدر كبير من الحذق و الحيلة لقياس المسافات الأصغر أيضاً من ذلك. كما لابد أن تخالجنا بعض الريبة على الأقل بأن من الممكن أن نجد في النهاية صعوبة أصيلة مبدئياً بالنسبة للمسافات الأدنى مستوياً. و لكن الطبيعة، كما تبين لنا، تدهشنا بلطفها، فقد ظهر أن الأعداد الحقيقية نفسها التي درجنا على استخدامها لوصف الأشياء على صعيد حياتنا اليومية أو الأوسع منه، تحافظ على فائدتها في المستويات الأصغر بكثير من الذرات ــ و من المؤكد حتى ما هو أقل من جزء من مئة من القطر " الكلاسيكي " لجسيم تحت ذري، مثل الإلكترون أو البروتون ــ بل يصل فيما يبدو حتى "مستوي الثقالة الكمومية" أي أصغر بعشرين مرتبة من مستوي هذا الجسيم ! إنه استقراء خارق بكل معنى الكلمة عُمم من التجربة. كما يبدو أن مفهوم المسافة المألوف، المعبر عنه بعدد حقيقي، يصلح أيضاً لأبعد الكوازارات و لما هو بعدها، بإعطائه مجالا من مرتبة 10^{42} على الأقل، أو ربما 10^{60} أو أكثر. و الحقيقة أنه قلما راودنا الشك في أن نظام الأعداد الحقيقية هو النظام الملائم. فيا ترى، لماذا نولي هذه الأعداد قدراً كبيراً من الثقة عندما نريد الدقة في الوصف الفيزيائي، في حين أن خبرتنا الأولية المتعلقة بملاءمة مثل هذه الأعداد هي خبرة تقع في مدى محدود نسبياً ؟ . لابد أن هذه الثقة ــ التي ربما كانت في غير محلها ــ تستند إلى الأناقة المنطقية في منظومة هذه الأعداد ، وإلى اتساقها و قوتها الرياضية (على الرغم من أن ذلك لا يعترف لها به دائماً). هذا، إضافة إلى الاعتقاد بانسجام الطبيعة الرياضي العميق.

---

* يذكر القارىء أن الكتابة 10^{20} ترمز للعدد 1 و على يمينه عشرين صفرا أي 100000000000000000000

يبدو أن منظومة الأعداد الحقيقية لا تملك حق احتكار قوة الرياضيات و أناقتها . إذ إن هناك دوماً بعض العقبات، منها مثلاً أن الجذور التربيعية لا يمكن أن تحسب إلا للأعداد الموجبة (أو الصفر)، وليس للأعداد السالبة. ولكن تبين من الوجهة الرياضية ــ بصرف النظر مؤقتاً عن أي مسألة تتعلق مباشرة بالعالم الفيزيائي ــ أن من المناسب إلى أبعد الحدود أن نكون قادرين على استخراج الجذور التربيعية للأعداد السالبة علاوة على الأعداد الموجبة. و كل مايلزمنا لذلك هو أن نسلم بوجود جذر تربيعي للعدد 1 ــ أو " نخترعه " و هذا ما نعبر عنه بواسطة الرمز "i"، فلدينا إذن:

$$i^2 = -1$$

ومن الواضح أن الكمية i لا يمكن أن تكون عدداً حقيقياً، لأن جداء أي عدد حقيقي في نفسه هو دائما عدد موجب (أو صفر إذا كان العدد نفسه صفراً). و لهذا السبب أطلقت عبارة **تخيلية Imaginary** اصطلاحاً على الأعداد التي مربعاتها سالبة. ولكن يجب أن نشدد على حقيقة أن هذه الأعداد " التخيلية " لا تقل واقعية عن الأعداد " الحقيقية" التي أصبحنا نألفها. ثم إن العلاقة، كما أكدت منذ البدء، بين هذه الأعداد " الحقيقية " و الواقع الفيزيائي ليست مباشرة أو ملزمة كما قد يبدو لأول وهلة ، فهي، بما هي عليه ، تتطلب الارتفاع إلى مستو رياضي مثالي على درجة عالية جداً من الرهافة و الدقة لا تقدم لها الطبيعة **مبدئياً** أي مبرر واضح.[x]

والآن، وقد أصبح لدينا جذر تربيعي للعدد (1 ـ)، فلن نحتاج إلى جهد كبير كي نعطي الجذور التربيعية لجميع الأعداد الحقيقية. لأنه إذا كان a عدداً حقيقياً موجباً، فإن المقدار

$$i\sqrt{a}$$

هو الجذر التربيعي للعدد الحقيقي السالب a - . (و يوجد أيضاً جذر تربيعي آخر لهذا العدد و أعني به $-i\sqrt{a}$). وماذا بشأن i نفسها، ألها جذر تربيعي؟ أجل، لها حتماً. لأن من السهل التحقق بأن مربع المقدار التالي:

$$(1+i)/\sqrt{2}$$

(وكذلك مربع هذا المقدار نفسه مسبوقاً بإشارة ــ) هو i . ثم إن هذا العدد نفسه ، أله جذر تربيعي ؟ و الجواب للمرة الثانية نعم لأن مربع المقدار:

$$\sqrt{\frac{(1+1/\sqrt{2})}{2}} + i\sqrt{\frac{(1-1/\sqrt{2})}{2}}$$

[x] بل إن التجربة تؤكد أنه من المستحيل الوصول إلى هذه الدرجة من الدقة.

ومربع نظيره السالب هو فعلا $\sqrt{2}$ / (1 + i)

لنلاحظ أننا أبحنا لأنفسنا عند تكوين هذه المقادير جمع الأعداد الحقيقية مع الأعداد التخيلية، إضافة إلى ضرب أعداد بأي عدد حقيقي (أو تقسيمها على أي عدد حقيقي غير الصفر. الأمر الذي لا يختلف عن ضربها بمقلوب هذا العدد) . إن الأشياء التي نحصل عليها من هذه العمليات هي ما ندعوه الأعداد العقدية. فالعدد العقدي هو العدد من الشكل a + ib : حيث a و b هما عددان حقيقيان يدعيان الجزء **الحقيقي** و الجزء **التخيلي** من العدد العقدي . أما قواعد جمع عددين من هذه الأعداد أو ضربهما فهو يتبع قواعد الجبرالعادية التي تعلمناها في المدرسة ، إضافة إلى القاعدة $i^2 = -1$:

$$(a + ib) + (c + id) = (a + c) + i(b + d)$$

$$(a + ib)(c + id) = ac - bd + i(ad + bc)$$

إن ما يحدث لهو شيء مدهش ! لقد كان دافعنا لإيجاد منظومة هذه الأعداد هو توفير الإمكانية الدائمة لإيجاد الجذور التربيعية. و هي تحقق هذا الشرط فعلاً و إن لم يكن الإجراء نفسه بعد واضحا. و بإمكانها أن تقوم بما هو أكثر من ذلك بكثير، إذ يمكن إيجاد الجذور التكعيبية أو الخامسة أو التاسعة و التسعين ، أو من المرتبة π، أو من المرتبة 1 + i إلخ،] و هذا كله من دون أن يصادفنا عدم اتساق منطقي (الأمر الذي استطاع أن يثبته رياضي القرن الثامن عشر العظيم ليونارد أويلر Leonard Euler). ولكي نرى مثالا آخر عن سحر الأعداد العقدية، دعونا نتفحص دساتير المثلثات المعقدة المظهر إلى حد ما، و التي على المرء أن يتعلمها في المدرسة. و هي دستورا جيب و جيب متممة لمجموع زاويتين.

$$\sin(A + B) = \sin A \cos B + \cos A \sin B$$

$$\cos(A + B) = \cos A \cos B - \sin A \sin B$$

إن هذين الدستورين ليسا سوى القسمين الحقيقي و التخيلي ، على الترتيب ، للمعادلة العقدية * الأبسط منهما بكثير (والتي يسهل تذكرها أكثر من سابقاتها):

$$e^{i(A+B)} = e^{iA+iB} = e^{iA}e^{iB}$$

وكل ما نحتاج إلى معرفته هنا هو " دستور أويلر " (الذي وجده كما يبدو قبل أويلر بسنوات عديدة الرياضي البريطاني البارز روجرز كوتس Rogers Cotes في القرن السادس عشر).

$$e^{iA} = \cos A + i \sin A$$

* إن الكمية ..... e = 2.7182818285 (أساس اللغرتم الطبيعي. وهو عدد غير ناطق irrational له أهمية في الرياضيات تضاهي أهمية العدد π . (و هو يعرف بالسلسلة:

$$e = 1 + 1/1 + 1/(1\times2) + 1/(1\times2\times3) + 1/(1\times2\times3\times4) + \ldots$$

و e^z تعني القوة من المرتبة z للعدد e ، و لدينا : $e^z = 1 + z/1 + z^2/1\times2 + z^3/(1\times2\times3) + \ldots$

الذي يمكن أن نعوض بموجبه في المعادلة السابقة : فيكون التعبير الحاصل:

$$\cos (A + B) + i \sin (A + B) = (\cos A + i \sin A) (\cos B + i \sin B)$$

فإذا قمنا بإنجاز الجداء في الطرف الأيمن نحصل على العلاقات المثلثاتية المطلوبة.

و علاوة على ما سبق، إن أي معادلة جبرية مثل:

$$ao + a_1 z + a_2 z^2 + a_3 z^3 + ...+ a_n z^n = o$$

(فيها... , $\alpha_0 , \alpha_1 , \alpha_2$ هي أعداد عقدية و $a_n \neq 0$). هي معادلة يمكن حلها دائماً بالنسبة للعدد العقدي z. من ذلك مثلا أنه يوجد عدد عقدي يحقق العلاقة:

$$z^{102} + 999z^{33} + \pi z^2 = - 417 + i$$

على الرغم من أن هذا الأمر ليس واضحاً على الإطلاق! و قد أطلق على هذه الحقيقة العامة اسم " نظرية الجبر الأساسية ". و كان العديد من رياضيي القرن الثامن عشر قد جهدوا للبرهان على هذا الاستنتاج (الحدسي) حتى أن أويلر نفسه لم يجد اثباتاً عاماً مقنعاً. ثم أعطى العالم و الرياضي العظيم كارل فريدريك غوص Carl Friedrich Gauss في عام 1831 خط الإثبات الرائع بأصالته و قدم أول برهان عام . و كانت النقطة الأساسية التي فتحت باب البرهان هي التمثيل **الهندسي** للأعداد العقدية، ثم استخدام برهان توبولوجي* Topological

في الواقع ، لم يكن غوص حقيقة أول من استخدم وصفاً هندسياً للأعداد العقدية . فقد سبقه إلى ذلك بمئتي عام تقريباً ، و اليس Wallis و لكن بصورة فجة، ولم يستخدمه في مثل النتائج القوية الواثقة التي توصل إليها غوص . إلا أن الاسم المرتبط بهذا التمثيل الهندسي للأعداد العقدية ، هو اسم جان روبرت أرغان Jean Robert Argand المحاسب السويسري. و قد وصف هذا التمثيل في عام 1806. هذا على الرغم من أن المساح النروجي كاسبار فيسيل Caspar Wessel كان قد أعطى في الحقيقة وصفا كاملا قبله بتسع سنوات. ولكني سأشير إلى التمثيل الهندسي القياسي للأعدادالعقدية باسم مستوي أرغان، و ذلك تمشياً مع التسمية الشائعة (و إن يكن ذلك غير دقيق تاريخياً).

إن مستوي أرغان ليس سوى مستو إقليدي عادي منسوب إلى محورين ديكارتيين نظاميين، محورx ، و محور y . حيث تدل x على البعد الأفقي (موجبة إلى اليمين و سالبة إلى اليسار). و تدلy على البعد الرأسي (موجبة إلى الأعلى و سالبة إلى الأسفل). وعندئذ يمثل العدد العقدي.

---

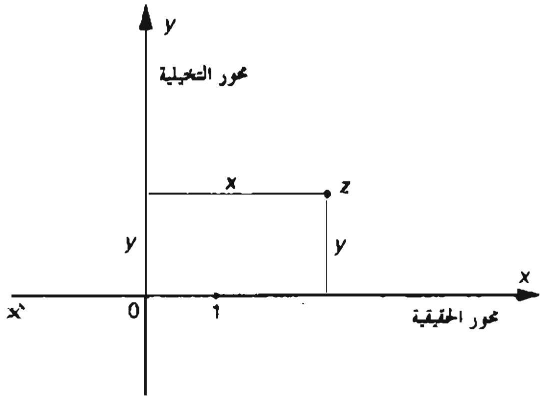
* تشير كلمة " توبولوجي " إلى نوع من الهندسة ــ يسمى أحيانا " هندسة الملاءة المطاطية rubber sheet geometry "ـ ففي هذه الهندسة لا أهمية للمسافات الفعلية . و ما له صلة و أهمية فيها هو الخواص الاستمرارية للأشياء.

$$z = x + iy$$

بنقطة في مستوي أرغان إحداثياها

$$(x , y)$$

(أنظر الشكل 3 - 8) :

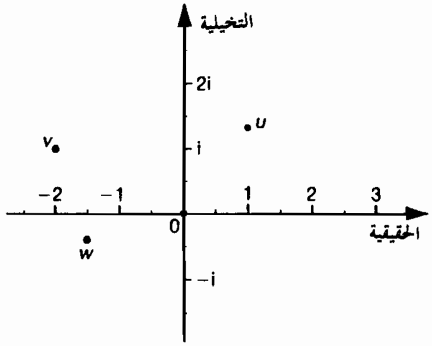


الشكل 3 ــ 8 : مستوي أرغان لوصف عدد عقدي $z = x + iy$

[لنلاحظ أن 0 (بصفته عدداً عقدياً) يمثل مبدأ الإحداثيات، و 1 يمثل بنقطة معينة على المحور x`o x)]

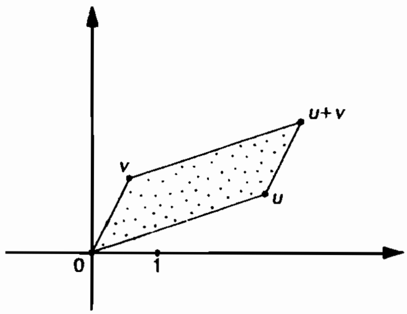
يزودنا مستوي أرغان ببساطة، بطريقة لتنظيم طائفة الأعداد العقدية في صورة هندسية مفيدة، و مثل ذلك التمثيل ليس فيه حقاً ما هو جديد بالنسبة لنا. فقد ألفنا قبله الطريقة التي يمكن أن نرتب بها الأعداد الحقيقية في صورة هندسية، وأعني بها صورة الخط المستقيم الذي يمتد من جهتيه إلى اللانهاية، و يرمز لنقطة معينة من هذا المستقيم بالرمز 0 ، ويرمز لنقطة أخرى بـ1. فالنقطة 2 تقع في موضع منزاح عن 1 بقدر إزاحة 1 نفسها عن 0 .و النقطة 1/2 هي النقطة المتوسطة بين 0 و 1 ... إلخ . و النقطة I ــ تقع بصورة أن 0 هو النقطة المتوسطة بينها و بين 1 .... إلخ . و تسمى مجموعة الأعداد الحقيقية الممثلة بهذه الطريقة، باسم **مستقيم الأعداد الحقيقية**. أما في حالة الأعداد العقدية، فلدينا في الحقيقة عددان حقيقيان نستخدمهما إحداثيين و أعني بهما a وb بالنسبة للعدد العقدي $a + ib$. فهذان العددان يعطياننا إحداثيين لتعيين نقاط مستو ما ــ هو مستوي أرغان، وقد أشرت في الشكل 3 ــ 9، بصورة تقريبية إلى المواضع التي توجد فيها الأعداد العقدية.

$u = 1 + i\,1{,}3$ $\qquad$ $v = -2 + i$ $\qquad$ $w = -1{,}5 - i\,0{,}4$



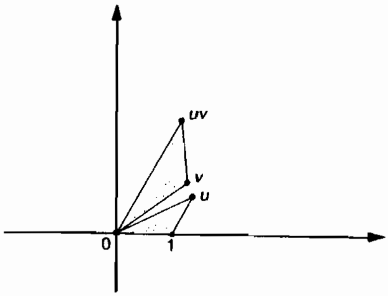
الشكل 3 ــ 9 : مواضع الأعداد u ، v ، w في مستوى أرغان

إن العمليات الجبرية الأساسية ، من جمع الأعداد العقدية و ضربها ، تجد الآن صيغة هندسية واضحة ، فلنر الجمع أولا . لنفرض أنu وv عددان عقديان ، ممثلان في مستوي أرغان بحسب المخطط أعلاه . فيكون مجموعهما u + v ممثلاً "بالمجموع المتجهي " للنقطتين ، بمعنى أن المجموع u + v يمثل بالنقطة التي تكمل مع u وv و0 متوازي أضلاع . و ليس من الصعب أن نرى أن هذا الإنشاء (الشكل 3 ــ 10) يعطي المجموع فعلاً. و لكني لن أعطي هنا تعليلاً لذلك:



الشكل 3 ــ 10 : نحصل على المجموعu + v لعددين عقديين u و v بحسب قانون متوازي الأضلاع.

إن للجداء uv أيضاً تأويلا هندسياً واضحاً (أنظر شكل 3 ـــ 11) و إن تكن رؤيته أصعب بقليل . (وهنا أيضاً حذفت التعليل) . إن الزاوية التي رأسها المبدأ و المحصورة بين 1 و uvهي بمجموع الزاويتين بين 1 و u و بين 1 و v (و تقاس جميع الزوايا بالاتجاه المعاكس لدوران عقارب الساعة) . أما بعد uv عن المبدأ فيساوي جداء المسافتين من المبدأ إلىu ومن المبدأ إلى v ، و هذا يعني أن المثلث المتكون من النقاط 0 وv و uv مشابه (ومماثل بالاتجاه) للمثلث المكون من النقاط 0 و 1 و u (نسبة التشابه | V |).



الشكل 3 ــ 11 : إن النقطة uv التي تمثل في الشكل جداء العددين u و v تقع بحيث يكون المثلث الذي رؤوسه 0 و v و uv مشابهاً للمثلث الذي رؤوسه 0 و 1 و u . و نتيجة لذلك تكون مسافة uv عن 0 هي جداء المسافتين u عن 0 و v عن 0 . كما أن الزاوية التي يصنعها uv مع محور الأعداد الحقيقية تساوي مجموع الزاويتين اللتين يصنعانهما u و v مع محور الأعداد الحقيقية.

(يمكن للقارىء النشيط الذي لم يعتد هذه الإنشاءات أن يلجأ إلى التحقق بأنها تنتج مباشرة من القواعد الجبرية لجمع الأعداد العقدية وضربها التي قدمناها سابقا ، و من المطابقات المثلثية السابقة).

إنشاء مجموعة مندلبروت

لقد أصبحنا الآن في وضع يؤهلنا لكي نرى كيف نعرف مجموعة مندلبروت . ليكن z عدداً عقدياً ما. فمهما كان هذا العدد . فإنه يمثل بنقطة في مستوي أرغان . و لنأخذ الآن التطبيق الذي يستعاض فيه عن z بعدد عقدي جديد وفقاً للقاعدة:

$$z \longrightarrow z^2 + c$$

حيث c عدد عقدي آخر **ثابت** (أي معطى). إن العدد $z^2 + c$ سيمثل بنقطة جديدة في مستوي أرغان . فمثلاً إذاً كان العدد الثابت c هو 1.63 - i4.2 عندئذ يستعاض عن النقطة z بنقطة جديدة وفقاً للتطابق:

$$z \longrightarrow z^2 + 1.63 - i4.2$$

فإذا كان لدينا z = 3 مثلاً، يستعاض عنها بالعدد العقدي التالي:

$$3^2 + 1.63 - i\,4.2 = 9 + 1.63 - i\,4.2 = 10.63 - i\,4.2$$

كما يستعاض عن العدد 2.7 + i 0.3 - مثلاً بالعدد:

$$(- 2,7 + i\ 0,3)^2 + 1,63 - i4,2)$$
$$= (- 2,7)^2 - (0,3)^2 + 1,63 + i \{ 2 (-2,7) (0,3) - 4,2 \}$$
$$= 8,83 - i\ 5.82$$

و يستحسن أن تنفذ هذه الحسابات ـــ عندما تتعقد ـــ بحاسوب إلكتروني.

و الآن، مهما تكن c ، فإن العدد 0 يستعاض عنه وفق هذا التطبيــق بـالعدد المعطـى c . و مـاذا عن c نفسه ؟ إنه هو أيضاً يستعاض عنه بالعدد $c^2 + c$ نفسه. عندئذ نحصل على :

$$(c^2 + c)^2 + c = c^4 + 2c^3 + c^2 + c$$

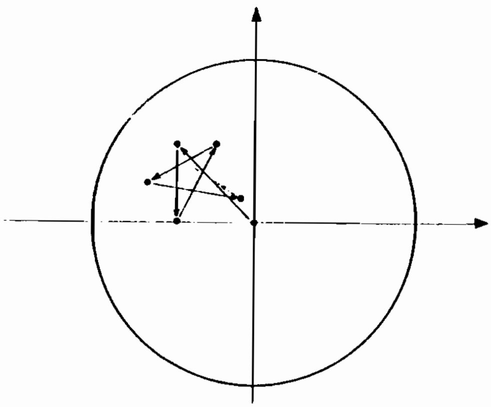
و لنكرر أيضا هذه الاستعاضة، و نطبقها مرة تالية على العدد أعلاه ، فنحصل على:

$$(c^4 + 2c^3 + c^2 + c)^2 + c = c^8 + 4c^7 + 6c^6 + 6c^5 + 2c^3 + c^2 + c$$

ثم نطبقها أيضا على هذا العدد و هكذا دواليك . فنحصل على متتالية من الأعداد العقدية، تبدأ من o:

$$o, c, c^2 + c, c^4 + 2c^3 + c^2 + c, \ldots..$$

فإذا قمنا الآن بهذه الحسابات بعد اختيار **قيــم معينــة** للعـدد العقـدي المعطـى c ، نحصـل علـى متتالية من الأعداد التي لا تذهب بعيدا جدا عن المبدأ في مستوي أرغان. أو بقول أوضـح تظـل المتتالية **محدودة** بالنسبة لهذه القيم المختارة لـ c . الأمر الذي يعني أن كل عنصر في المتتالية يقــع داخل دائرة **ثابتة** مركزها في المبدأ (أنظر شكل 3 ــ 12):



الشكل 3 ـــ 12 : تكون متتالية النقط محدودة في مستوي أرغان إذا وجدت دائرة ثابتة تحوي جميع هذه النقط (إن الوضع التكراري الخاص الممثل بالشكل يبدا بالصفر و فيه. $c = -1/2 + i\ 1/2$)

ولدينا مثال جيد عن الحالة التي يظهر فيها ذلك.هي حالة. $c = 0$ لأن كل عنصر في المتتاليـة يساوي الصفر في هذه الحالة . و هذا مثال آخر عن سلوك محدود للمتتالية يحدث حين $c = -1$، فالمتتالية عندئذ هي :....0,-1,0,-1,0,-1 ، كما يحدث ذلك أيضاً حـين تكـون $c = i$ والمتتاليـة عندئذ هي ,,0,i,i-1,-i,i-1,-i,i-1,-i : على أن المتتالية ، في حال c تساوي قيمـا أخـرى مختلفـة، تذهب بعيدا و بعيدا إلى اللانهاية عـن المبـدأ، أي تكـون المتتاليـة **غـير محـدودة**، و لا يمكـن أن تكون محتواة داخل دائرة ثابتة . و مثل هذا السلوك يحدث مثلاً عندما $c = 1$ لأن المتتالية تكـون

عندئذ ....,0,1,2,5,26,677,458330 و هذا ما يحدث أيضاً عندما 3 - = c وتكـون المتتاليـة 0, ...,3,6,33,1086‒ كذلك عندما c = i -1 و تكون المتتالية:

0 , i-1 , -i -1 , -1+3i , -9-i5 , 55+91 i, -5257+10011i ,.....

إن **مجموعة مندلبروت**، أو بقـول آخـر، المنطقـة **السـوداء** مـن عـالم توربلـد ـــ نـام، هـي بالتحديد المنطقة المكونة من النقط c من مستوي أرغان التي تكون المتتالية عندها محـدودة . أمـا المنطقة **البيضاء** فهي تتكون من النقط c مـن مستوي أرغـان الـتي تكـون المتتاليـة عندهـا غـير محدودة. و الأشكال التفصيلية التي رأيناها في البدء، رسمت كلها بوساطة الحواسيب. إذ يفحص الحاسوب بسرعة و بطريقة منهجية حالة السلسلة حين تُعطى مختلف القيم للعدد العقدي c . إذ يجد عند كل خيار لــ c ، المتتالية ....o,c,c^2+c,.... و يقرر وفقاً لمعيار خاص بذلك ، هـل تظـل المتتالية محدودة أم لا . فإذا كانت محدودة ، عندئذ يعمل الحاسوب على إظهار بقعة سوداء على الشاشة عند النقطة الموافقة لـــ c . و إذا لم تكـن محـدودة يعمـل علـى إظهـار بقعـة بيضـاء. و الخلاصة أن الحاسوب هو الذي سيقرر عند كل نقطة من المجال موضوع البحث ، هل سـتكون هذه النقطة ملونة بالأسود أم بالأبيض.

إن تعقيد مجموعة مندلبروت ملفت للنظـر جـدا و بخاصـة أن تعريفهـا ، شـأنه شـأن معظـم التعاريف الرياضية، مذهل في بساطته. و مما يلفت النظر أيضا أن البنية العامـة لهـذه المجموعـة لا تتغير كثيراً مع تغيير الصيغة الجبرية الدقيقة للتطبيق الذي اختزناه($z \longrightarrow z^2 + c$) فالكثـير من التطبيقات العقدية المكررة تعطي بنى متشابهة تشابهاً عجيباً (بشرط أن نختار عدداً مناسـباً نبدأ به ــ ربما ليس صفراً، و إنما عدداً نعـرف قيمتـه بقـاعدة رياضيـة واضحة عنـد كـل اختيـار مناسـب للتطبيـق). بـالفعل ، إن لبنـى " مندلـبروت " هـذه طبيعـة عامـة أو مطلقـــة بالنسـبة للتطبيقات العقدية المكررة. و قد أصبحـت دراسـة هـذه البنـى اليـوم موضوعـا قائمـا بذاتـه في الرياضيات يعرف باسم ***المنظومات الديناميكية العقدية***.

واقعية المفهوم الرياضي الأفلاطونية

ترى إلى أي مدى هي " واقعية " كائنات عالم الرياضي ؟ يبدو من وجهـة نظر معينـة أن ليس فيها شيء من الواقعية على الإطلاق و أن الكائنات الرياضيـة ليسـت سـوى مفـاهيم ، أو تجريدات عقلية يقوم بها الرياضيون، ويثيرها عندهم مظهر جوانب من العالم المحيط بنا و النظـام البادي في هذه الجوانب، و لكنها تجريدات عقلية ليس إلا. وهل يمكن أن تكون أكثر من مجـرد بنى اعتباطية يبنيها عقل الإنسان ؟ و في الوقت نفسه كثيرا ما تلـوح في هـذه المفـاهيم ملامـح واقعية عميقة الجذور تمتد إلى أبعد من تبصرات أي رياضي متميز. فكأن تفكير الإنسـان موجـه نحو حقيقة خارجية أزلية، حقيقة ، لها واقعية قائمة بذاتها، و لا تنكشف إلا جزئيـاً لأي واحـد منا.

إن في مجموعة مندلبروت مثالاً مدهشا لنا . فبنيتها المتقنة اتقاناً [x] عجيباً، لم تكن من ابتكـار أي شخص بمفرده، و لا هي من تصميم فريق من الرياضيين. وحتى مندلبروت نفسه، الريـاضي البولوني ـ الأميركي (أبو النظرية الكسورية Fractal) الذي كان أول من درس المجموعـة (3)، لم يكن لديه تصور حقيقي مسبق عن هذا الاتقان الساحر الكامن فيهـا ، علـى الرغـم مـن أنـه عرف بأنه كان في الطريق إلى شيء مهم جـداً. بـالفعل، فحـين بـدأت أوائـل الصـور تبـدو في حاسوبه بالظهور ، سيطر عليه انطباع بأن البنى الغائمة التي كان يراها ، كانت نتيجة عجز في الحاسوب (Mandelbrot 1986) ! لم تتكون لديه القناعة بأن هذه الصورهي فعلاً من المجموعة نفسها إلا فيما بعد. أضف إلى ذلك أن تفاصيل التعقيـد في بنيـة مجموعـة مندلـبروت، لا يمكـن لأحد منا أن يستوعبها بأجمعها استيعاباً كاملاً، بل و لا يمكن حتى لأي حاسـوب أن يكشـف عنها كلها . و يبدو أن هذه البنية ليست مجرد جزء من عقولنا، و إنما هي **حقيقة** قائمة بذاتها . و أي رياضي أو أي مفتون بالحواسـيب يقـرر دراسـة المجموعـة، سـيجد أمامـه تقريبـات للبنيـة الرياضية الأساسية **نفسها**. و لا يوجد فرق حقيقي سواء استخدم هذا الحاسوب أو ذاك لإنجـاز الحسابات (بشرط أن يكون الحاسـوب في حالـة عمـل جيـدة)، و ذلـك بصـرف النظـر عـن اختلاف الحواسيب في سرعة العمل و الذاكرة ، أو في إمكانيات عرض الرسـوم الـتي يمكـن أن تؤدي إلى اختلاف في مقدار التفاصيل الدقيقة أو في سـرعة الحصـول علـى هـذه التفـاصيل . و الغاية الأساسية من استخدام الحاسوب هي نفسها غاية الفيزيائي المجرب من استخدام جهاز من أجهزته لاكتشاف بنية العالم الفيزيـائي . أو بمعنـى آخـر ، إن مجموعـة مندلـبروت ليسـت مـن ابتكار عقل الإنسان ، و إنما هي اكتشاف ، **فمجموعة** مندلبروت ، مثلها مثل جبـل إفرسـت ، إنها بكل بساطة **موجودة** .

و لا تختلف في ذلك منظومة الأعداد العقدية نفسها عن مجموعة مندلبروت ، فهي أيضـا لهـا واقع عميق خارج عن الزمن ، يتجاوز بكثير البنى العقلية التي يبنيها أي رياضي.و لقـد ظهـرت بدايات الاهتمام بالأعداد العقدية تقريباً مع أعمال جيرولامو كاردانو. Gerolamo Cardano وكان هذا إيطاليا عاش من عام 1501 إلى 1576 و امتهن مهنة الطب. و كان مغامراً و مطالعـاً للبخت (و قد طالع مرة بخت المسيح) . و قد ألف بحثا مهماً و بالغ الأثر في الجبر عام 1545، سماه " Ars Magnas". وفيه قدم أول تعبير عام عـن حلـول معادلـة تكعيبيـة عامـة [*] (بدلالـة **الصم**، أي الجذور من المرتبة n) . وقد أشار فيه مع ذلك إلى أنه كان مضطراً في أحد أصنـاف هذه المعادلة ــ و هو الذي يوصف بأنـه " غـير قـابل للاختـزال " و فيـه يكـون للمعادلـة ثلاثـة

[x] لاحظ الشكل الذي سماه المؤلف توربلد ـ نام. إنـه شـكل تزييـني متقـن علـى الرغـم ممـا في مظهـره الأول مـن شـواش وتعقيد.

[*] وقد استند جزئيا إلى أعمال سابقة قام بها Scipione del Ferro و Tartaglia .

جذور حقيقية ــ إلى استخدام **الجذر التربيعي لعدد سالب** في إحدى مراحل التعبير عن الحل. و على الرغم من أن هذا الأمر قد حيره ، فقد أدرك أنه لا يمكن أن يجد الحل إلا ضمن هذه الشروط فحسب (حين تكون الإجابة النهائية دائماً عدداً حقيقياً). و فيما بعد، في عام 1572 وسع ، بومبلي **Raphael Bombelli** عمل كاردانو في كتاب عنوانه **L' Algebra** و بدأ بدراسة الجبر الفعلي للأعداد العقدية.

قد يبدو لأول وهلة أن إدخال هذه الجذور التربيعية لأعداد سالبة هو مجرد وسيلة ــ أي ابتكار رياضي مخصص لإنجاز غرض معين ــ في حين أنه أصبح واضحا فيما بعد أن هذه الأشياء تنجز أعمالاً أكثر بكثير من تلك التي خصصت لها في الأصل. و على الرغم من أن الغرض الأصلي من إدخال الأعداد العقدية كان كما ذكرت سابقاً، هو جعل الجذور التربيعية تؤخذ دونما خوف من الزلل في النتائج ، فقد وجدنا أننا حصلنا، بإدخال هذه الأعداد، على هبة إضافية هي قدرتنا على حساب أي نوع آخر من الجذور و على حل أي معادلة جبرية مهما كانت. كما وجدنا فيما بعد أن لهذه الأعداد خواص سحرية أخرى عديدة لم يكن لدينا عنها في البدء أي فكرة . و هذه الخواص كانت **موجودة**. و ليس كاردانو هو الذي وضعها هناك (أو أوجدها)، و لا بومبلي ، و لا واليس ، و لا كواتس ولا أويلر و لا فيسل و لا غوص ، على الرغم من بعد بصيرة هؤلاء و غيرهم من كبار الرياضيين . فقد كان هذا السحر جزءاً من طبيعة البنية نفسها التي اكتشفها هؤلاء بالتدريج . فكاردانو نفسه حين أتى بأعداده العقدية لم يكن في استطاعته أن يكوّن أي فكرة عن الخواص السحرية العديدة التي تتالت من هذا الاكتشاف ــ و هي الخواص التي تحمل أسماء متنوعة، مثل دستور تكامل كوشي **Cauchy** ، ونظرية تطبيق ريمان **Riemann** ، وخاصة لوي **Lewy** في التوسيع .إن هذه الخواص و حقائق أخرى عديدة مدهشة هي كلها خواص موجودة في تلك الأعداد نفسها التي اكتشفها كاردانو أول الأمر في عام 1539 و من دون أن يضاف على هذه الأعداد أي تعديلات مهما كانت.

ترى هل الرياضيات ابتكار أم اكتشاف ؟ وهل كل ما يقوم به الرياضيون حين يتوصلون إلى نتائجهم، هو أنهم ينتجون أبنية عقلية معقدة ليس لها واقع حقيقي، و أن كل ما في الأمر هو أن قوة هذه الأبنية و أناقتها تكفي لجعل مبتكريها أنفسهم يخدعون و يعتقدون بـ " واقعيتها " مع أنها مجرد أبنية عقلية ؟ أم هل أن الرياضيين ، هم حقاً مكتشفو حقائق هي في الواقع موجودة " هناك " ــ أو قل حقائق لها وجود مستقل استقلالا تاما عن نشاط الرياضيين ؟ أعتقد بأن من الضروري أن يكون القارىء على بيِّنة تامة منذ الآن بأني من أنصار الرأي الثاني، وليس الأول، و ذلك على الأقل بسبب هذه البنى المماثلة للأعداد العقدية و لمجموعة مندلبروت.

على أن المشكلة قد لا تحسم بمثل هذا الوضوح ، ففي الرياضيات توجد ، كما قلت ، أمور تكون كلمة "اكتشاف" فعلاً، أنسب لها بكثير من كلمة " ابتكار. " منها مثلا تلك التي

أوردتها الآن . و هذه هي الحالات التي تتكشف فيها البنية عن أشياء أكثر بكثير مما يوضع فيها في بدء العمل . ففي مثل هذه الحالات يمكن للمرء أن يأخذ بالرأي القائل إن الرياضيين قد عثروا مصادفة على عمل من " أعمال الرب " . و لكن توجد حالات أخرى لا تتصف فيها البنية الرياضية بصفة الوحدانية الملزمة، منها مثلاً أن الرياضي يجد و هو في غمرة البرهان أنه بحاجة إلى أن يحتال للأمر و يبتكر بناء كان يمكن ابتكار غيره لكي يأتي على نتيجة من نوع خاص جداً. و في مثل هذه الحالات يرجح ألا تتكشف البنية عن أشياء أكثر من تلك التي وُضعت فيها في البدء. و تبدو كلمة "ابتكار " هنا أنسب من كلمة" اكتشاف " . و هذا بالفعل مجرد عمل من أعمال الإنسان. " فالاكتشافات الرياضية الحقيقية إذن، اعتماداً على وجهة النظر هذه ، يجب أن ينظر إليها ، بوجه عام ، بأنها انجازات أو تطلعات تستحق التقدير أكثر بكثير مما تستحقه " الابتكارات ".

ولا تختلف هذه التصانيف كل الاختلاف عن تلك التي تستخدم في الفنون و الهندسة . فالأعمال الفنية العظيمة" أقرب إلى ا لله " من تلك الأدنى منها مرتبة . و شعور الفنانين بأنهم يكشفون في أعمالهم العظيمة عن حقائق أبدية لها نوع من الوجود الأثيري المسبق * ، ليس شعوراً غير شائع بين الفنانين ، في حين أنهم يشعرون بأن أعمالهم الأدنى جودة يغلب عليها الطابع التحكمي وصفة الأشياء التي لا تعدو كونها زائلة . و لا يختلف عن ذلك الابداع الهندسي الحسن التنظيم الذي ينجز معظمه من منظور تطبيق بسيط لفكرة غير منتظره، فقد يكون أنسب له أن يوصف بأنه اكتشاف أكثر منه ابتكار.

على أنني بعد هذه الملاحظات التي عرضتها، لا أقدر أن أتمالك نفسي من الشعور بأن الاعتقاد بنوع من الوجود الأثيري الخالد، هو في الرياضيات أقوى بكثير مما في الحالات الأخرى، على الأقل بالنسبة للمفاهيم الرياضية الجوهرية . ففي هذه الأفكار الرياضية التي تبدو مختلفة كل الاختلاف في مرتبتها عن تلك التي يمكن توقعها في الفنون أو في الهندسة، توجد عمومية شاملة ووحدانية ملزمة . و كان الفيلسوف اليوناني العظيم أفلاطون قد طرح منذ القديم (360 ق.م) وجهة نظر كهذه بأن المفاهيم الرياضية يمكن أن توجد بمعنى أثيري خارج عن الزمن. لذلك كثيرا ما يشار إلى وجهة النظر هذه بالأفلاطونية الرياضية . و سيكون لها عندنا أهمية كبيرة فيما بعد.

لقد ناقشت في الفصل الأول بشيء من التطويل وجهة نظر الذكاء الاصطناعي **القوي** التي تزعم أن الظواهر العقلية تنبع من فكرة الخوارزمي الرياضية. و شددت في الفصل الثاني على أن مفهوم الخوارزمي هو فعلاً فكرة عميقة " و هبها لنا ا لله ".وفي هذا الفصل،حاولت أن أثبت أن هذه الأفكار الرياضية التي " وهبها لنا ا لله" لابد أن لها وجودا خارجا عن الزمن و مستقلا عن

---

* أو كما قال الكاتب الأرجنتيني الشهير بورجيس Jorge Luis Borges : " .... الشاعر الشهير إبداعه أقل من اكتشافه" .....

أفكارنا الخاصة الدنيوية . و لكن ألا ترون أن وجهة النظر هذه قد أعطتنا ــ بإعطائها للظواهر العقلية إمكان وجود من النوع الأثيري ــ شيئا من الثقة بوجهة نظر الذكاء الاصطناعي القوي؟ ببساطة ، يمكن تصور الأمر كذلك ــ حتى أني سأحصر تفكيري فيما بعد ضمن وجهة نظر ليست بعيدة كل البعد عن هذه . و لكن و إن كان بإمكان الظواهر العقلية أن يكون لها فعلا هذا النوع من الوجود العام، فأنا لا أعتقد بأن الأمر يمكن أن يكون كذلك بالنسبة لمفهوم الخوارزمية. إذ لابد لها لكي تكون كذلك من شيء أكثر رهافة و سموا بكثير. و ستكون هذه الحقيقة (وأعني بها القول بأن الأمور الخوارزمية تكون جزءاً ضيقاً جداً و محدوداً من الرياضيات) جانباً مهماً في مناقشاتنا التالية. و في الفصل التالي سنبدأ بالاطلاع على شيء من مجالات الرياضيات اللاخوارزمية و رهافتها.

الملاحظات

1 ـ أنظر (Mandelbrot 1986) . وقد اقتبست التكبيرات الخاصــة المتتاليـة مـن أمثلـة وردت في (Reitgen و Richter 1986) حيث نجد صوراً ملونة رائعة من مجموعــة مندلـبروت، و مـن يود أمثلة توضيحية أكثر إثارة للدهشة ـ فليراجع . (Peiten Saupe 1988) .

2 ـ إن المطالبة بأن من الضروري دائماً وجود قاعدة **من نوع** ما لتعيين قيمة الرقم النوني في أي عدد حقيقي، هي، بحسب إطلاعي، وجهة نظر متسّقة و إن تكن غير تقليدية، علـى الرغـم من أن هذه القاعدة قد لا تكون فعالة ولا قابلة للتعريف إطلاقاً في أي نظام صوري مخصص مسبقاً لهذا الغرض (أنظر الفصل الرابع). و إني لآمل بأن يكون هذا المطلب متسقاً، لأنـه يمثل وجهة النظر التي هي أكثر ما أتمنى أن أناصرها بنفسي.

3 ـ هناك، في الحقيقية، خلاف حول معرفة من كان أول من عثر على هـذه المجموعـة (أنظـر Matelski و Brooks، 1981 وكذلكMandelbrot 1989)، ولكن حقيقة وجود الخـلاف نفسها تقدم المزيد من الدعم لوجهة النظر القائلة بأن هذه المجموعة هي اكتشاف أكثر منهـا ابتكار.

الفصل الرابع

الحقيقة و البرهان و البصيرة

برنامج هلبرت للرياضيات

ترى، ما هي الحقيقة ؟ ... كيف نصوغ أحكامنا التي من قبيل : **هذا صحيح وهذا غير صحيح**، بشأن هذا العالم؟ هل أن مايقودنا إلى ذلك هو مجرد **خوارزمية** كان الاصطفاء الطبيعي، بسيرورته القادرة، قد فضلها على غيرها من الخوارزميات، التي كانت من غير شك أقل منها جدوى ؟ . أم ترى يمكن أن تكون هناك طريقة أخرى للتكهن بالحقيقة يرجح أنها غير خوارزمية ـ كأن تكون الحدس أو الغريزة أو البصيرة ؟ إنها فيما يبدو مشكلة صعبة. فأحكامنا تتعلق بتراكيب معقدة مترابطة مكونة من بيانات مستشعرة و استدلالات، وعمليات تكهن. أضف إلى ذلك أنه قد لا يكون هناك اتفاق عام حول ما هو حقيقي و ما هو مزيف في كثير من المواقف الدنيوية. و تسهيلاً للمسألة، دعونا ندرس الحقيقة **الرياضية** فقط. ترى كيف نصوغ أحكامنا ـ أو ربما أيضا معرفتنا " الموثوقة " ـ المتعلقة بالمسائل الرياضية ؟ ففي هذا المجال على الأقل يجب أن تكون الأمور محسومة. بحيث لا توجد مشكلة بشأن ما هو فعلاً صحيح و ما هو فعلا خطأ ـ أم ترى ثمة مشكلة ؟ إذ ما هي ، بالفعل، الحقيقة الرياضية ؟

إن مشكلة الحقيقة الرياضية مشكلة قديمة جدا تعود إلى أيام فلاسفة اليونان و رياضييها الأوائل ـ و لا شك أنها أقدم من ذلك أيضاً. و لكن منذ ما ينوف على المئة عام الماضية فقط، أو نحوها، ألقيت أضواء عظيمة جداً على بعض الأمور ، و ظهرت **رؤى جديدة** رائعة في أصالتها و عمق تبصرها، و هي ما سنحاول أن نفهمه هنا. فهذه القضايا المستجدة أساسية جدا و لها صلة بصميم مشكلتنا حول سيرورة تفكيرنا : هل هي فعلا خوارزمية بكل معنى الكلمة بطبيعتها أم هي غير ذلك، إنه لمن المهم جداً بالنسبة لنا أن نحسم الأمر معها.

لقد خطت الرياضيات في نهاية القرن التاسع عشر خطوات واسعة جدا . و يعود ذلك جزئياً إلى تطور طرائق البرهان الرياضي و تزايد قوتها المستمر . (و كان في طليعة من أنجز هذه التطورات ديفد هلبرت و جورج كانطور، اللذان سبق ذكرهما ، إضافة إلى الرياضي الفرنسي العظيم هنري بوانكاريه الذي سنأتي على ذكره فيما بعد). و هكذا اكتسب الرياضيون ثقة في استخدام هذه الطرائق الفعالة التي كان الكثير منها يتضمن استخدام

مجموعات Sets * ذات عدد غير منتــه مـن العنـاصر ، و صـارت الـبراهين ناجحـة في أكـثر الأحيان للسبب الذي لأجله صار من الممكن النظـر إلى هـذه المجموعـات علـى أنهـا " أشـياء " حقيقية ــ أي كيانات تتمتع بوجود كامل، و ليس بمجرد إمكان الوجود . و قد نبع الكثير مـن هذه الأفكار القوية من مفهوم كانطور عن **الأعداد اللانهائية** الرفيع في أصالتـه، و الـذي كـان كانطور قد طوره تطويراً متسقاً مستخدماً مجموعات غير منتهية (وقد أخذنا لمحة عـن ذلـك في الفصل السابق).

على أن هذه الثقة تحطمــت في عام 1902 عنــدما توصل الفيلســوف و المنطقـي البريطـاني برتراند رَسّل Bertrand Russel إلى مفارقته الشهيرة الآن (التي سـبقتها مفارقـة كـانطور الـتي تنتج مباشرة من طريقة البرهان القائمة على "الشق القطري ") . و لكي نفهم حجـة رسـل في مفارقته ، لا بد لنا أولا من أن نكوِّن فكرة حـول مـا يتضمنـه النظـر إلى المجموعـة بأنهـا كيـان مكتمل . و لأجل ذلك يمكننا أن نتخيل مجموعة ما مميزة بصفة **خاصة** معينـة . مثـال ذلـك، إن مجموعة الأشياء الحمراء تتميز بخاصة **الحمرة** . بمعنى أن الشيء (أي شيء) يمكن أن ينتمـي إلى هذه المجموعة، إذا، و فقط إذا، كانت له صفة الحمـرة . الأمـر الـذي يبيـح لنـا أن نتحـول عـن الأشياء ، و نتحدث عن الخاصة بصفتها شيئاً مفرداً، أي عن مجموعة الأشـياء بكاملهـا الـتي لهـا هذه الخاصة. "فالحمرة " من وجهة النظر هذه، هي مجموعة كل الأشياء الحمراء[x] (و يمكننـا أن نتصور أيضاً أن بعض المجموعات الأخرى موجودة " في الطـرف الآخـر "، بمعنـى أن عناصرهـا تتميز بأن ليس لها هذه الصفة البسيطة).

وقد كانت هذه الفكرة القائمة على تعريف مفهوم ما بأنه " مجموعة " هي لب الطريقة التي أتى بها المنطقي الألماني البالغ الأثر غوتلوب فريجه Gottlob Frege في عام 1884 ، و بواسـطتها يمكن تعريف الأعداد (الطبيعية) بصفتها مجموعات. فمثلاً مالذي نعنيه بالعدد الفعلي 3 ؟ نحـن نعلــم مــا هــي خاصــة " الثلاثيــة " و لكــن مــا هــي 3 نفســها ؟ إن " الثلاثيــة " (بالفتح) هي كما نعلم خاصة في **تجمعات** أشياء ، أعني أنها خاصـة في **مجموعـات**. إذ يكـون للمجموعة خاصة " الثلاثية " هذه ذاتها ، إذا ، و فقط إذا ، كان فيها بالتحديد ثلاثة عنـاصر . مثال ذلك إن مجموعة الفائزين بميداليات لعبة أولمبية معينة ، هي مجموعة لهـا خاصـة " الثلاثيـة " هذه. وكذلك مجموعة الإطارات في الدراجة الثلاثية ، أو مجموعـة الأوراق المحمولـة علـى أحـد

---

* تعني المجموعة ببساطة تجمعاً من الأشياء ـ سواء أكانت أشياء فيزيائية أم رياضية ـ يمكن أن تعامل ككـل. وعنـاصر (أو أفراد) المجموعة في الرياضيات هي نفسها في أكثر الأحيان مجموعات، لأن المجموعـات يمكـن أن تتجمـع وتكـون (مـن تجمعها) مجموعات أخرى، وهكذا يمكن أن نصادف مجموعة مجموعات أو مجموعة مجموعات مجموعات وهكذا ......

[x] الفكرة المتضمنة في هذه النظرة هي أننا نستطيع أن نعبر عن صفة الحمرة بمجموعة هي مجموعة الأشياء الحمراء (أي أن الحمرة اسم لصنف الأحمر).

أعواد نبتة نفل (أو برســـيم)[x] عادية، أو مجموعة حلول المعادلة. $x^3-6x^2+11x-6=0$ والآن، ما هو تعريف فريجه Frege للعدد 3 ذاته ؟ إن هذا العدد ، عند فريجه ، يجب أن يكون مجموعة مجموعات، أعني أنه، مجموعة كل المجموعات التي لها خاصة " الثلاثية " (1). وعلى هذا يكون للمجموعة ثلاثة عناصر إذا، و فقط إذا، كانت تنتمي إلى مجموعة فريجه 3.

قد يبدو هذا التعريف لفا و دورانا ، و لكنه في الحقيقة ليس كذلك . إذ يمكن أن نعرف **الأعداد** بوجه عام بأنها كليات من مجموعات متكافئة . و تعني كلمة " متكافئة " هنا ، أن "عناصر هذه المجموعة يمكن أن ترفق بعناصر الأخرى إرفاق واحد من هذه بواحد من تلك" (أعني، بعباراتنا المألوفة، أن " لهما العدد نفسه من العناصر") فالعدد 3 عندئذ هو ذاته مجموعة هذه المجموعات التي أحد عناصرها على سبيل المثال : هو مجموعة تحوي مثلاً: تفاحة واحدة ، و برتقالة واحدة ، و إجاصة واحدة . و هنا نلاحظ أن هذا التعريف للعدد 3 ، مختلف كليا عن تعريف 3عند تشيرش ، الذي أعطي في الصفحة 75 كما يمكن أن تعطى أيضا تعاريف أخرى هي إلى حد ما أكثر انتشارا في هذه الأيام.

و الآن، ماذا عن مفارقة رَسّل ؟ إنها تتعلق بالمجموعة R التي تعرف على النحو التالي:

R هي مجموعة كل المجموعات التي ليست عناصر من ذواتها

وهكذا فإن R هي تجمع مجموعات. و المعيار الذي يحدد انتماء مجموعة X إلى هذا التجمع هو أن لا تكون X نفسها واحداً من عناصرها **الخاصة بها**.

هل من غير المعقول أن نفترض **إمكان** وجود مجموعة ما هي **فعلاً** عنصراً من نفسها ؟ كلا، فهذا ليس بغير معقول. لنأخذ مثلاً المجموعة ***I*** التي هي مجموعة المجموعات **غير المنتهية** (أي المجموعات التي عناصرها كثيرة بصورة لا نهائية).لا ريب أن المجموعات اللانهائية المختلفة كثيرة جداً بصورة لا نهائية. فالمجموعة Iإذن هي نفسها لا نهائية. لذلك تنتمي I في الحقيقة إلى نفسها! فكيف يؤدي إذن مفهوم رسل إلى مفارقة ؟ لكي نرى ذلك، دعونا نتساءل هل أن مجموعة رسل R نفسها عنصراً من نفسها أم لا ؟ إذا لم تكن عنصراً من نفسها، فلا بد عندئذ أن تنتمي إلى R . لأن R تتكون تحديداً من تلك المجموعات التي هي ليست عناصر من ذاتها. لذلك R تنتمي حتماً إلى R ، وهذا تناقض. هذا من جهة، و من جهة ثانية ، إذا كانت R عنصرا من نفسها ، فعندئذ ، لما كانت، " نفسها "، هي في الحقيقة R فهي تنتمي إلى تلك المجموعة التي تتميز عناصرها بأنها ***ليست*** عناصر من ذاتها، أعني أنها في النتيجة ليست

---

[x] قد يحمل ساق نبتة النفل (أو الورقة المركبة للبرسيم) أكثر من ثلاث ورقات وهذه حالة شاذ

عنصراً من ذاتها ــ وهذا أيضاً تناقض*.

لم تكن هذه الملاحظة التي انتبه إليها رسل في غير محلها ، فكل ما فعله هو أنه استخدم نوع الاستدلال الرياضي العام جدا القائم على نظرية المجموعات، و الذي كان الرياضيون قد بدؤوا يستخدمونه في براهينهم ، ولكن بأقصى صورة. ومن الواضح أن الأمور قد **خرجت** عندئذ من أيديهم و صار أحدى بهم أن يكونوا أكثر وضوحا بشأن نوع الاستدلال و ما هو المسموح به و ما هو غير المسموح به . و كان من الضروري طبعاً أن يكون الاستدلال المسموح به خالياً من التناقض، و أن لا يسمح إلا باشتقاق الإفادات الصحيحة فحسب من إفادات معروف مسبقاً بأنها صحيحة. و قد شرع رسل نفسه مع زميله الفرد نورث وايتهد **Alfred North Whithead** بتطوير نظام من البديهيات و قواعد الإجراء هو أعلى مستو من الشكلية الرياضية، وكان هدفهما طبعاً هو التأكيد على إمكانية التعبير عن جميع أنماط الاستدلال الرياضي الصحيح في إطار مشروعهما هذا ! ولقد اختارا قواعدهما بكل عناية و بصورة تجنبهما أنماط الاستدلال الخطرة التي أدت إلى مفارقة رسّل نفسه. فكان هذا المشروع المميز الذي وضعاه، أثراً من الآثار الخالدة. إلا أنه كان مرهقاً جداً، فانتهى أمره إلى أن أصبح في الحقيقة محصوراً في أنماط الاستدلال الرياضي التي يتضمنها. وكان الرياضي العظيم ديفيد هلبرت الذي أتينا على ذكره لأول مرة في الفصل الثاني، قد بدأ مشروعا أكثر شمولية و أصلح للممارسة و العمل . فكان يتضمن **جميع** أنماط الاستدلال الرياضي الصحيح لأي مجال خاص من مجالات الرياضيات. و علاوة على ذلك، كان هلبرت يبغي منه أن يصبح بالإمكان **البرهان** على أن مشروعه كان خالياً من التناقض . و عندئذ تصبح الرياضيات قائمة مذ ذاك و إلى الأبد على أساس مأمون لا مطعن فيه.

على أن آمال هلبرت و كل من تبعه تبددت في عام 1931. إذ توصل الرياضي الألمعي، عالم المنطق النمساوي كورت غودل **Kurt Godel** ، ذو الخمسة و عشرين ربيعاً، إلى نظرية هدمت بلا رجعة كل برنامج هلبرت. فقد أثبت غودل أن كل نظام مكون من بديهيات و قواعد رياضية محددة (" صورية ") لنهج ما أيا كان بشرط أن يكون واسعاً بما يكفي لأن يحوي التعبير عن الدعاوي الحسابية البسيطة (التي من قبيل " نظرية فيرما الأخيرة " ˣ التي رأيناها في الفصل الثاني) و بشرط أيضاً أن يكون خالياً من التناقض، هذا النظام لا بد أن يحوي بعض

* توجدطريقة طريفة للتعبير عن مفارقة رسل بلغة مألوفة جدا : لنفرض وجود مكتبة فيها دليلان ، أحدهما يحوي بالتحديد أسماء جميع الكتب الموجودة في المكتبة التي تذكر اسمها في مكان ما منها، و الآخر يحوي بالتحديد أسماء جميع الكتب التي لا تأتي على ذكر نفسها : ففي أي الدليلين يرد ذكر الدليل الثاني؟

ˣ لم يختر المؤلف هذه الإفادة لعدم وجود برهان عليها وإنما اختارها مثالاً عن الإفادات الحسابية. فمثلاً كان يمكن أن يختار أن كل عدد يمكن تحليله إلى عوامله الأولية بشكل وحيد فقط.

الإفادات التي لا يمكن البرهان لا على صحتها و لا على عدم صحتها، وذلك بأي وسيلة من داخل النظام . لذلك فإن صحة هذه الإفادات " لا يمكن البت في أمرها " (أو كما سنسميها " لا بتوتة " undecidable) بالإجراءات الموافق عليها . و قد استطاع غودل في الحقيقة أن يثبت أن الإفادة ذاتها المعبرة عن اتساق منظومة البديهيات نفسها ، يجب أن تكون ، عند ترميزها في صيغة دعوى حسابية مناسبة، واحدة من تلك الدعاوي " اللا بتوتة " ، و سيكون فهمنا لطبيعة لا بتوتيتها هذه مهماً جداً بالنسبة لنا. و سنرى لماذا طعنت حجة غودل هذه برنامج هلبرت في الصميم. كما سنرى كيف أن حجة غودل ستمكننا، باستخدام البصيرة ، من المضي إلى أبعد من حدود أي نظام [أو بناء] رياضي خاص (تحت الدراسة)، مصاغ صياغة صورية. كما سيكون تفهمنا لهذا الأمر حاسماً بالنسبة للكثير من المناقشات التي سترد في هذا الكتاب.

الأنظمة الرياضية الصورية

لا زال يلزمنا أيضا إلقاء بعض المزيد من الضوء حول ما هو المقصود من " منظومة صورية من البديهيات وقواعد الإجراء ". فمثلاً يجب أن يكون لدينا قائمة بالرموز التي نعبر بواسطتها عن إفاداتنا الرياضية . و لا بد حتماً من أن تكون هذه الرموز كافية لأن توفر لنا ما يدل على الأعداد الطبيعية لكي يصبح " الحساب " جزءاً من بنائنا. وإذا شئتم ، يمكن أن نكتفي باستخدام التدوين العربي المألوف للأعداد 0 , 1 , 2 , 3 ...... 9 , 10 , 11 , 12 ...... , على الرغم من أن هذا التدوين يجعل تحديد مضامين القواعد أعقد قليلا مما تحتاجه فعلاً، و أننا سنحصل على تحديد أسهل بكثير فيما لو استخدمنا مثلاً 0 , 01 , 011 , 0111 , 01111,...... للدلالة على متتالية الأعداد الطبيعية (أو يمكن أن نستخدم التدوين الثنائي كحل وسط). و مع ذلك، مهما يكن التدوين المستخدم **فعلاً** في النظام، فإني سأثابر على استخدام التدوين العربي (للأعداد الطبيعية)، على الرغم من أن هذا قد يسبب التباساً فيما يلي من المناقشات. كما قد نحتاج إلى رمز يدل على " فراغ " يفصل بين مختلف " كلمات " نظامنا أو " أعداده" .غير أن هذا قد يودي أيضا إلى التباس ، لذلك ، يمكن ببساطة ، استخدام الفاصلة (,) لهذا الغرض حيثما نحتاجها. كما سنحتاج أيضاً إلى أحرف للدلالة على "متغيرات" اختيارية تأخذ قيمها من الأعداد الطبيعية مثل ... $t, u, v, w, x, y, z, \grave{t}, \grave{\grave{t}}, \grave{\grave{\grave{t}}}, \grave{\grave{\grave{\grave{t}}}}$ وقد تأخذ هذه المتغيرات قيمها أيضاً من الأعداد الصحيحة(أو من الأعداد الناطقة ... و لكن دعونا نكتفي هنا بالأعداد الطبيعية) ، .... و قد نحتاج أيضا للأحرف المزودة بفتحات (أو شرطات) مثل $\grave{t}, \grave{\grave{t}}$ .... لأننا لا نريد أن نضع حداً لعدد المتغيرات التي يمكن أن تظهر في عباراتنا . فنعتبر **الفتحة** (́) رمزاً منفصلاً في النظام الصوري، وبذلك يظل عدد الرموز

الفعلي منتهياً [x] . كما سنحتاج إلى رموز تدل على العمليات الحسابية الأساسية = , + , × , إلخ . وربما أيضاً على مختلف أنواع الأقواس (,) ، [,]، و على الرموز **المنطقية** مثل ∧ ("و") ⇒ (يقتضي)، V (" أو")، ⇔ (" إذا وفقط إذا ") . ~ ("لا"، أو " ليس صحيحاً أن ....."). إلى ماسبق، سنحتاج إلى "المكممات " المنطقية "Logical "quantifiers ، و هي : مكم الوجود ("يوجد ... بصورة أن "). و مكم الشمول∀ (" لأجل كل ..... لدينا ") . و هكذا يمكننا أن نكوّن الآن إفادات مثل إفادة " نظرية فيرما الأخيرة " [مع مراعاة أن المتغيرات عندنا تأخذ قيمها من الأعداد الطبيعية].

$$\sim \ \exists w , x , y , z \left[(x+1)^{w+3} + (y + 1)^{w+3} = (z+1)^{w+3} \right]$$

(أنظر الفصل الثاني ص 88). (كان بإمكاني أن أكتب 0111 للدلالة على "3" ، و ربما أن أستخدم رمزاً للدلالة على "الرفع إلى قوة "، الأمر الذي قد يلائم بصورة أفضل الصيغة الصورية. و لكني، كما قلت، سأثابر على استخدام الرموز التقليدية لكي لا أسبب التباسا لا ضرورة له). وأما الإفادة السابقة فتقرأ (حتى القوس المربعة الأولى) على النحو التالي:

" لا توجد أربعة أعداد طبيعية w , x , y , z ، بصورة أن ....."

كما يمكن أن نعيد كتابة " نظرية فيرما الأخيرة " باستخدام الرمز : ∀

$$\forall \ w , x , y , z \left[\sim (x+1)^{w+3} + (y + 1)^{w+3} = (z+1)^{w+3} \right]$$

و تقرأ (حتى ختام رمز النفي الواقع بعد القوس المربعة الأولى) على النحو التالي:

" لأجل أي من الأعداد الطبيعية w,x,y,z ، ليس صحيحاً أن .... "

التي تعني الشيء نفسه الذي عنته الإفادة التي قبلها.

سنحتاج أيضاً إلى أحرف للدلالة على دعاوي كاملة ، و سنستعمل لهذا الغرض أحرفاً كبيرة : P,Q,R,S, ... فقد تكون إحدى الدعاوي مثلاً توكيد فيرما المنوه عنه سابقاً:

$$F = \sim \ \exists w , x , y , z \left[(x+1)^{w+3} + (y + 1)^{w+3} = (z+1)^{w+3} \right]$$

وقد **تتعلق** الدعوى بمتغير أو أكثر . فقد يحتاج الأمر إلى تركيز الاهتمام مثلاً على قوة معينة * في توكيد فيرما :

$$G (w) = \sim \ \exists \ \ x , y , z \ \left[(x+1)^{w+3} + (y + 1)^{w+3} = (z+1)^{w+3} \right]$$

---

[x] على الرغم من أن صحة دعوى فيرما كاملة لم تعرف بعد (سبق أن أشرنا ص 89 إلى وجود برهان شبه مؤكد الآن على صحتها) إلا أن حقيقة الدعاوي الفردية G (o)، G (1)، G (2)، G(3)، ..... مؤكدة حتى ما يقرب من G(125000) بمعنى أنه لا يوجد مكعب هو بمجموع مكعبين ، و لا يوجد قوة رابعة تساوي بمجموع قوتين رابعتين و هكذا ... حتى الإفادة الموافقة للقوة 125000.

وهكذا تؤكد الإفادة G(o) على أنه " لا يمكن لمكعب عدد طبيعي أن يكون مجموع مكعبي عددين طبيعيين " كما أن G(1) تؤكد الشيء نفسه في حالة القوى الرابعة وهكذا .....
(لا حظ أن "w" حذفت من يمين "∃") فتوكيد فيرما بأن G(w) صحيح مهما تكن w، يمكن أن نعبر عنه الآن بما يلي :

$$F = \forall\ w [G (w)]$$

إن G ( ) هي مثال على ما يدعى **دالة دعوية propositional Function**، أعني دعوى متعلقة بمتغير أو أكثر.

و ليست بديهيات axioms النظام (الصوري)، في الحقيقة، سوى دعاو عامة يمكن إدراجها في لائحة منتهية، و يفترض أن صحتها، بعد إعطاء معاني الرموز فيها، واضحة من ذاتها . فمثلاً، سيكون لدينا من جملة بديهياتنا، البديهيات التالية (التي تعد صحيحة) مهما تكن الدعاوي أو الدوال الدعوية ( ) Q , P , R:

$$(P \ \&\ \ Q) \Rightarrow P$$

$$\sim (\sim P) \Leftrightarrow p$$

$$\sim \exists\ \ x [R (x)] \Leftrightarrow \forall\ x [\sim R (x)]$$

إن صحة هذه الدعاوي الواضحة من ذاتها، محققة حالاً من **معانيها** (فالأولى تؤكد ببساطة أنه " إذا كان P وQ كلاهما صحيحان، فإن P صحيحة ". و الثانية تؤكد التكافؤ بين الإفادتين: " ليس صحيحاً أن P خطأ " و " P صحيحة ". و الثالثة سبق أن مثلت بالتكافؤ المنطقي بين طريقتي التعبير عن نظرية فيرما الأخيرة التي سبق ذكرها. و يمكن أيضا أن نضع بين البديهيات، بديهيات حسابية أساسية ، مثل:

$$\forall x , y [x + y = y + x]$$

$$\forall x ,y,z [(x + y)\times z = (x \times z)+(y\times z)]$$

هذا على الرغم من أننا قد نفضل التوصل إلى بناء هذه العمليات الحسابية منطلقين من أشياء أكثر بدائية، ثم استنتاج هذه الإفادات التي تصبح عندئذ نظريات . و ستكون قواعد الإجراء أموراً (واضحة من ذاتها) مثل :

" من(P) و (P ⇒ Q) يمكن أن نستنتج Q "

" من[R (x)] ∀ x يمكن أن نستنتج أي دعوى نحصل عليها بالتعويض عن x بعدد طبيعي معين فيR(x) " إن هذه الإجراءات هي تعليمات نعرف منها كيفية الوصول إلى دعاو جديدة انطلاقا من دعاو سابقة مثبتة.

والآن إذا انطلقنا من البديهيات و طبقنا قواعد الإجراء مرة بعد أخرى، نستطيع أن نتوصل إلى لائحة طويلة من الدعاوي . علما أنه يمكننا الاستعانة بأي بديهية من البديهيات أكثر من

مرة في أي مرحلة من المراحل. كما يمكننا العودة إلى استخدام أي دعوى من الدعاوي التي سبق أن أضفناها إلى قائمتنا المتزايدة. ويطلق على دعاوي أي لائحة سبق أن جمعت بطريقة صحيحة اسم **نظريات Theorems** أو مبرهنات (على الرغم من أن العديد منها سيكون دعاوي تافهة، أو إفادات لا أهمية لها في الرياضيات). و إذا كان لدينا دعوى معينة P، ونريد **البرهان عليها**، نحاول عندئذ إيجاد لائحة كتلك، يكون جمعها قد تم بطريقة صحيحة وفقاً لهذه القواعد بحيث تنتهي بهذه الدعوى الخاصة P. فهذه اللائحة هي التي تزودنا **ببرهان** على الدعوىP داخل النظام. و بذلك تصبحP نفسها عندئذ نظرية جديدة.

كانت الغاية التي سعى إليها هلبرت في برنامجه هي أن يجد لكل مجال معرف على نحو جيدٍ في الرياضيات لائحة من البديهيات و قواعد الإجراء تكون شاملة شمولا يكفي لجعل جميع صيغ الاستدلال الرياضي الصحيحة المناسبة لهذا المجال، مشمولة فيه. فدعونا نقصر مجالنا هنا في الرياضيات على **الحساب** (على أن يحوي المكمين ∃ و ∀ وأن يكون بالإمكان الوصول فيه إلى دعاوٍ من قبيل نظرية فيرما الأخيرة). وبالنسبة لنا هنا، لن نحصل على أي تحسين إذا أخذنا أي مجالٍ أعم من ذلك. لأن مجال الحساب مجال عام يكفي **حالياً** لكي نطبق عليه نهج غودل . فلو قبلنا بأن هذا النظام الشامل الذي بين أيدينا من البديهيات وقواعد الإجراء يتمشى فعلا مع برنامج هلبرت (بالنسبة لمجال الحساب) لكان لدينا عندئذ معيار لا لبس فيه "لصحة "البرهان الرياضي على أي دعوى في الحساب . و قد كان الأمل معقودا بالفعل على أنه من الممكن أن يكون نظام البديهيات والقواعد **كاملاً** . بمعنى أنه سيمكننا مبدئياً من البت في صحة أو خطأ أي إفادة رياضية يمكن صياغتها في إطار هذا النظام.

و قد كان لدى هلبرت أمل في أن أي سلسلة من الرموز ، ممثلة لدعوى رياضية ، و لتكن P ، لا بد أن يكون بالإمكان البرهان **إما** علىP و **إما** علىP~ ، و ذلك حسبما تكون P صحيحة أو خطأ . هذا مع الفرض الضروري بأن السلسلة مكونة تكويناً نحوياً صحيحاً (syntactically correct) يكون فيه للدعوىP معنى واضح لا لبس فيه : إما صحيح و إما خطأ. أما المقصود هنا أساسا من عبارة " نحويا صحيحا " فهو أن هذا التكوين يحقق جميع قواعد تدوين الرموز في المنهج الصوري، كأن تكون الأقواس مفتوحة و مغلقة بطريقة صحيحة و هكذا .... و لكن لو تحقق أمل هلبرت لاستغنينا حتى عن الاهتمام نهائياً بما **تعنيه** الدعاوي! ولاكتفينا بأن تكون P مجرد سلسلة صحيحة نحوياً من الرموز. فإذا كانت P نظرية (أعني يمكن البرهان عليها من داخل النظام)، عندئذ نقدر لها **قيمة صحة هي صحيحة**، أما إذا كان بالعكسP~ هي نظرية ، عندئذ نقدر لـ P قيمة صحة : **خطأ**. و لكن لا بد لكي يكون ذلك كله معقولاً من أن يكون النظام **متسقاً** و كاملاً [x] أيضاً . و اتساق النظام يعني أنه لا يجوز أن

---

[x] المقصود من نظام كامل هو أن أي دعوى فيه (صحيحة نحوياً) هي إما صحيحة وإما خطأ.

توجد سلسلة من الرموز P تكون P لأجلها نظرية، و في الوقت نفسه P~ نظرية أيضاً. و إلا لأمكن أن تكون P **صحيحة و خطأ** في آن واحد. !

و الحقيقة أن وجهة النظر الصورية (وهي وجهة نظر هلبرت) تقول إنه من الممكن صرف النظر عن معاني الإفادات الرياضية، و اعتبارها بمجرد سلاسل من الرموز من نظام رياضي صوري. و ثمة من يحبذ هذه الفكرة التي تصبح الرياضيات بها مجرد " لعبة لا معنى لها "، و لكنها ليست بالفكرة التي تشدني . فـ " المعنى " هو الذي يهب الرياضيات مادتها و جوهرها، و ليست الحسابات الخوارزمية العمياء . فكان من حسن الحظ أن وجه غودل إلى هذه الصورية ضربة قاضية . لذلك دعونا نرى الآن كيف فعل ذلك.

نظرية غودل

على الرغم من أن إثبات غودل يضم في الأصل جانبا معقدا و كثير التفاصيل ، إلا أننا لسنا مضطرين لدراسة هذا الجانب ، لأن الفكرة المركزية تأتي في الجانب الآخر ، و هي سهلة و جميلة وعميقة . لذلك سنكون قادرين على تفهمها و تقديرها . أما الجانب المعقد (الذي يدل أيضا على مهارة فائقة) فهو يثبت بالتفصيل كيف يمكن التعبير فعلياً، **و بعمليات حسابية**، عن كل قاعدة من قواعد الإجراء، وكذلك عن استخدام مختلف البديهيات التي يضمها هذا النظام الصوري (وكان من أهم أوجه هذا الجانب الجوهري، هو التحقق بأن هذه الطريقة في التعبير كانت عملية مجدية فعلاً). و لكن لا بد لنا لتنفيذ طريقة التعبير هذه من إيجاد طريقة مناسبة لترقيم جميع الدعاوي بأعداد طبيعية، و هذا ما يمكن أن نقوم به بسهولة، وهو أن "نرتب" جميع سلاسل الرموز في النظام الصوري وفقاً لنوع من الترتيب " الأبجدي "، و ذلك بالتدريج بحسب أطوالها (فالسلاسل التي طولها واحد ترتب أبجدياً وتأتي أولاً، ويليها السلاسل التي طولها اثنان، ثم التي طولها ثلاثة وهكذا. وكلها مرتبة بحسب الترتيب الأبجدي). وهذه هي الطريقة المعروفة في ترتيب **المعاجم***. والحقيقة أن غودل استخدم في الأصل نظاماً ترقيمياً أعقد من ذلك، و لكن هذه الفروق ليست مهمة بالنسبة لنا. و سنوجه عنايتنا بوجه خاص إلى الدوال الدعوية التابعة لمتغير واحد . مثل G (w) الذي سبق ذكره . و الآن لتكن الدالة الدعوية P

---

* يمكن أن نتصور ترتيب المعجم على نمط الترتيب العادي للأعداد الطبيعية المدونة بالأساس "K + 1" ،الذي نستخدم فيه، للدلالة على k + 1 عدداً، مختلف النظام الصوري إضافة إلى " الصفر" الجديد، الذي لا يستخدم أبداً. (وينجم هذا التعقيد الأخير من أن الأعداد التي تبدأ من اليسار بصفر هي نفسها هذه الأعداد التي يحذف فيها هذا الصفر). إن ترتيب السلاسل السهل على نمط ترتيب المعجم بتسع رموز فقط هو ذاك الذي نحصل عليه بالأعداد الطبيعية التي يمكن أن تكتب بالتدوين العشري العادي من دون صفر 1 , 2 , 3 .... , 9 , 11 , 12 , ... , 19
21.... ,22 , ... , 99 ,111, 112......

التابعة لمتغير واحد و التي ترتيبها n (بحسب الترتيب الذي أخترناه لسلاسل الرموز) ، فتكون بعد تطبيقها على w :

$$P_n(w)$$

إننا نستطيع أن نتيح لترقيمنا، إذا شئنا، أن يكون ملوثاً بعض الشيء، بمعنى أن تكون بعض هذه العبارات غير صحيحة نحويا (لأن ذلك يجعل التعبير الحسابي عن العبارات أسهل بكثير مما لو حاولنا التخلص من تلك العبارات غير الصحيحة نحوياً). فإذا كانت $P_n(w)$ صحيحة نحوياً عندئذ تكون بكل معنى الكلمة إفادة حسابية معرفة تعريفاً جيداً، و تتعلق بالعددين الطبيعين w و n . أو إذا أردنا الدقة، فإنه، أيا كانت هذه الإفادة الحسابية، فإنها ستتوقف على تفاصيل الترقيم الخاص الذي اخترناه للنظام . و هذا أمر يرجع إلى الجانب المعقد من إثبات غودل ، الذي لن نهتم به هنا . أما سلاسل الدعاوي التي تؤلف في نظام ما، برهاناً على إحدى نظرياته، فهي أيضاً يمكن الإشارة إليها (أي ترقيمها) بأعداد طبيعية باستخدام مخطط الترتيب الذي قررناه. فليكن:

$$\Pi_n$$

البرهان الذي رقمه n . (وهنا أيضا يمكن أن نستخدم " ترقيماً ملوثاً " تصبح فيه العبارة Π_n غير صحيحة نحوياً في بعض الحالات من قيم n فلا تبرهن عندئذ على اي شيء) .

لننظر الآن في الدالة الدعوية التالية ، التي تتعلق بالعدد الطبيعي. w

$$\sim \exists\ x\,[\ \Pi_x \text{ proves } P_w(w)]$$

(حيث proves تعني تبرهن). فالإفادة الموجودة ضمن القوسين المربعتين معبر عنها جزئيا بكلمات، و لكنها، و بكل معنى الكلمة ، إفادة معرفة بدقة . إنها تؤكد أن البرهان الذي رقمه x هو في الحقيقة برهان على الدعوى P_w التي رقمها w والمطبقة على w نفسها. أما مكم الوجود المنفي (∃) الواقع خارج القوس المربعة فيفيد في استبعاد أحد المتغيرات و هو x (إذ يعني " لا يوجد عدد طبيعي x بصورة أن .... ")[x]، وهكذا ينتهي بنا الأمر إلى دالة دعوية حسابية تتعلق بمتغير واحد فحسب هو w إذ تؤكد العبارة بمجملها أنه لا وجود لبرهان على $P_w(w)$. و سأفترض أن العبارة أعلاه مصوغة صياغة نحوية صحيحة (و حتى لو كانت $P_w(w)$ ليست بمثل هذه الصياغة ــ ففي هذه الحالة أيضاً تكون العبارة أعلاه إفادة صحيحة، إذ لا وجود لبرهان على عبارة ليست صحيحة نحوياً) فالإفادة أعلاه أصبحت في الحقيقة من الناحية الفعلية إفادة حسابية تتعلق بالعدد الطبيعي w ، وذلك بسبب ترجمتها (التي افترضنا أنها نفذت سابقاً) إلى الحساب (هذا على اعتبار أن الجزء الواقع داخل القوسين المربعتين هو إفادة

---

[x] فالدالة الدعوية أعلاه تقرأ إذن: لا يوجد عدد طبيعي x لكي يكون البرهان الذي رقمه x برهاناً على الدالة الدعوية P(w) التي رقمها w نفسه.

حسابية حسنة التعريف تتعلق بعددين طبيعيين x و w). لكن يجب أن نلاحظ أنه ليس من المفروض أن يكون التعبير عن الإفادة بطريقة حسابية هو أمر واضح ، وإنما هو أمر ممكن . و قد كان البرهان على إمكان ذلك هو الجانب " الأكثر صعوبة " الذي تضمنه الجزء المعقد من إثبات غودل. أما معرفة أي إفادة حسابية هي بالتحديد، فهذا أمر، كما في السابق، متعلق بتفاصيل أنظمة العد ، و متعلق كثيراً جداً أيضاً ببنية البديهيات و القواعد المفصلة في نظامنا الصوري، وهذه أمور لا تعنينا هنا لأنها كلها من اختصاص الجزء المعقد في إثبات غودل.

و لما كنا قد رقمنا جميع الدوال الدعوية المتعلقة بمتغير واحد، فالدالة التي أوردناها منذ قليل لا بد أن تكون قد خصت أيضاً برقم . لنسم هذا الرقم k، و عندئذ تصبح دالتنا الدعوية هي تلك التي ترتيبها k في قائمة الدعاوي. وعليه فإن:

$$\sim \exists x [\Pi_x \text{ Proves } P_w(w)] = P_k (w)$$

فلنتفحص الآن هذه الدالة في الحالة التي تأخذ فيها w القيمة الخاصة : w = k فنحصل على

$$\sim \exists x [\Pi_x \text{ Proves } P_k(k)] = P_k (k)$$

و لكن الدعوى الخاصة P_k (k) هي بكل معنى الكلمة إفادة حسابية معرفة تعريفاً جيداً (أي صحيحة نحوياً). فيا ترى ألها برهان في نظامنا الصوري ؟ . أم أن نفيها، أي$\sim P_k(k)$، له برهان ؟ إن الجواب عن هذين السؤالين معا هو "لا ". و نستطيع أن نرى ذلك بعد التمعن في المعنى المتضمن في نهج غودل . فالدعوى P_k (k) على الرغم من أنها مجرد دعوى حسابية، فقد أنشأناها بصورة تؤكد ما كتب في الطرف الأيسر من المساواة أعلاه، ألا و هو التالي : لا يوجد برهان للدعوى P_k (k) داخل النظام " . فإذا كنا قد وضعنا بديهيات نظامنا و قواعد الإجراء فيه بتأن، وكلفنا أنفسنا بالقيام بترقيمها بالصورة الصحيحة ، فعندئذ لن نعثر على أي برهان للدعوىP_k (k) داخل النظام. لأنه لو وجد هذا البرهان ، لكان معنى الإفادة الذي تؤكده P_k (k) في الواقع، وأعني به أنه لا يوجد برهان، هو معنى خطأ، و كان من الضروري كذلك أن تكون P_k (k) بصفتها دعوى حسابية، أيضاً خطأ. و لكن لا يجوز أن يبنى نظامنا الصوري بهذه الصورة السيئة التي تفسح المجال فعلاً للبرهان على دعاوٍ خاطئة ! [x] . لذلك لا يوجد في واقع الأمر برهان للدعوى P_k (k) . و لكن هذا بالتحديد ما تريد أن تخبرنا به الدعوى P_k (k). لذلك يجب أن يكون ما تؤكده P_k (k) هو إفادة صحيحة ، و هكذا يجب أن تكونP_k (k) إفادة حسابية صحيحة. إذن لقد وجدنا دعوى **صحيحة ليس لها برهان داخل النظام !**

ولكن ماذا عن **نفي** هذه الدعوى، أي $\sim P_k$ (k) ؟ إن ما سبق يستلزم بأنه ينبغي ألا نكون قادرين أيضاً على إيجاد برهان لهذا النفي. إذ إن ما بيناه منذ قليل هو أن$\sim P_k$ (k) يجب أن

---

[x] لذلك يفترض عادة في البرهان على نظرية غودل أن يكون النظام الصوري متسقاً و إلا لكانت كل دعوى من دعاويه صحيحة وخاطئة في آن واحد (وسنرى ذلك بعد قليل).

تكون خطأ (لأن P_k (k) صحيحة)، وليس مفترضاً فينا أن نستطيع البرهان على دعـاو خاطئـة داخل النظام ! لذلك ، لاP_k (k) و لا P_k (k) ~ يمكن البرهان عليهما داخل نظامنا الصـوري. وهذا ما يثبت نظرية غودل.

البصيرة الرياضيــة

لنلاحظ أن شيئاً ملفتاً للنظر قد طرأ هنا. فالناس غالباً ما يحسبون أن نظريـة غـودل حـدث سلبي ـ لكونها في رأيهم تظهر محدودية ملزمة في التفكير الرياضي الصوري. لأننا مهما ظننا أن تفكيرنا فيها كان شاملاً، سنجد دائماً أن هناك دعاو قد أفلتت من شباك نظامنا . و لكـن هـل يجب أن نولي الدعوى الخاصة P_k (k) اهتمامنا ؟ لقد بينا في الحقيقة، في سياق البرهان السابق، أن P_k (k) إفادة صحيحة. و قد رأينا بطريقة أو بأخرى، أن P_k (k) صحيحة علـى الرغـم مـن أنه من غير الممكن البرهان عليها رسميـا داخـل النظـام الصـوري. و هـذا مـا يجـب أن يشـغل، بالفعل، بال الرياضي الصوري المتزمت، لأننا أثبتنا بهذا الاستدلال نفسـه أنـه لا بـد أن تكـون فكرة الرياضي الصوري عن " الحقيقة " غير كاملة بالضرورة . فبحسب ما سبق شرحه، سنجد أنه في أي **نظام** صوري (متسق) نستخدمه لصياغة الحساب، توجد إفادات يمكننا أن نرى أنها صحيحة، و مع ذلك لن نتوصل إلى إعطائها ــ بحسب النظام الصوري المقترح ــ قيمـة الصحـة **صحيحة**. و هنا يمكن للصوري المتزمت أن يلجأ إلى طريقة قد تمكنه من تجنب موقف كهذا، و هي ألا يتحدث عن مفهوم الصحة إطلاقاً، و إنمـا يكتفـي بـالرجوع إلى **قابليـة البرهـان** ضمـن نظام شكلي محدد . إلا أن هذه الطريقة تحد كثيراً من نشاطه كما يبدو. كما يمكنــه باسـتخدام وجهة النظر هذه، أن يصوغ، حتى إثبات غودل ، بالطرقة المبينة أعلاه، لأن الجـانـب الأساسـي من هذا الإثبات، يستفيد من التفكير فيما هو صحيح فعلاً و ما هو غير صحيح (2). كما يلجأ بعض الشكليين إلى وجهة نظر أكثر " ذرائعية " بأن يعلنوا أنهم غير مبـالين بإفـادات مـن قبيـل P_k(k) ، لأنها إفادات بالغة التعقيد ، و ليـس لهـا أهميـة بـين الدعـاوي الحسـابية. وقـد يصـرح الشكلي من هؤلاء:

نعم، توجد إفادات غريبة من قبيل P_k(k) لا تتفق لأجلها فكرتي عن قابلية البرهان أو الصحة مع فكرتكم الحدسية عن الصحة. ولكن هذه الإفادات لن ترد إطلاقا في الرياضيات الجدية (أو على الأقل في نوع الرياضيات التي أهتم بها أنا) لأن هذه الإفادات معقدة فوق حدود المعقول عـلاوة علـى أنهـا من الناحية الرياضية غير طبيعية.

حقاً إن الدعاوي التي من قبيل P_k (k) كإفادات رياضية عن الأعداد، هـي مربكـة فعـلاً إلى أقصى الحدود، ومظهرها غير مـألوف حـين تكتـب كاملـة بعيـدا عـن الرمـوز . إلا أن بعـض الإفادات التي عرضت في السـنوات الأخيرة، و التي كانت مكافئة لنمط دعاوي غـودل فعـلاً، كانت معقولة في بساطتها، علاوة على أن صفاتها الرياضية مقبولة جداً (3). وهذه الإفادات لا

يمكن البرهان عليها بالاعتماد على بديهيات الحساب المتبعة، على الرغم من أنها تستخلص من خاصة " صحتها واضحة " وضوح صحة البديهيات نفسها.

يبدو لي أن اعتراف الشخص الصوري المسبق بعدم وجود أي اهتمام عنده " بالحقيقة الرياضية " هو وجهة نظر أستغرب جداً أن تتبناها فلسفة للرياضيات. فضلاً عن أن عدم الاهتمام هذا ليس أمراً عملياً إلى هذا الحد. فالرياضيون حين يصوغون أنماط تفكيرهم ، لا يرغبون في أن يلتزموا بتدقيق ما وصلوا إليه لكي يروا هل من الممكن أن تصاغ اثباتاتهم بدلالة بديهيات نظام صوري معقد و قواعد الإجراء فيه أم لا . بل كل ما يحتاجون إليه هو التأكد بأن اثباتاتهم هي طرق صالحة لتأكيد الحقيقة . أما البرهان الغودلي (نسبة إلى غودل) فهو إجراء صالح آخر كغيره. و لذلك يبدو لي أن $P_k(k)$ هي حقيقة رياضية صالحة لا أكثر، مثلها في ذلك مثل أي حقيقة رياضية يمكن الحصول عليها بطريقة تقليدية أكثر تستخدم فيها البديهيات و قواعد الإجراء التي تكون قد وضعت مسبقاً.

ثمة إجراء يطرح نفسه بنفسه و هو التالي، لنفرض أن $P_k(k)$ هي فعلاً دعوى صحيحة بكل معنى الكلمة، ولنشر إليها، في الوقت الحاضر فقط، بالرمز البسيط. G_0 لذلك نستطيع (اعتماداً على ذلك) أن نضيفها إلى نظامنا باعتبارها بديهية إضافية. و هكذا يتكون لدينا نظام جديد محسن عن السابق، وله طبعا دعواه الغودلية **الخاصة به**، و لتكن G_1 وهذه أيضا يمكن أن نرى فيها إفادة صالحة بكل معنى الكلمة حول الأعداد. و تمشياً مع ما سبق، نضيف G_1 أيضاً إلى نظامنا فنحصل بذلك على نظام محسن آخر له أيضا دعواه الغودلية الخاصة و لتكن G_2 (وهي أيضاً صحيحة بكل معنى الكلمة)، و يمكن كذلك أن نضيف هذه، فنحصل كالسابق على الدعوى الغودلية G_3، التي نضيفها أيضا و هكذا . و نكرر هذه العملية إلى اللانهاية . فيا ترى ما وضع النظام الناتج حين نسمح لأنفسنا باستخدام لائحتنا المتكونة **بأكملها** .. ، G_0 ، G_1 ، G_2 ، G_3 باعتبارها بديهيات إضافية ؟ هل يمكن أن يكون **هذا** النظام كاملاً ؟ إذ لربما لن يكون مؤكدا إمكان تطبيق نهج غودل، نظرا إلى أن لدينا الآن نظاما غير محدود (لا نهائي)من البديهيات . إلا أن هذا الاستمرار في إضافة دعاوي غودل هو مخطط منهجي بكل معنى الكلمة،و يمكن إعادة التعبير عنه كأنه نظام منطقي منته عادي من البديهيات و قواعد الإجراء . فهذا النظام سيكون له دعواه الغودلية الخاصة ، و لتكن G_w ، التي يمكن أيضا أن نضيفها ، ونحصل عندئذ على الدعوى G_{w+1} الغودلية للنظام الناتج .فإذا تكرر هذا العمل كما في السابق، نحصل على لائحة الدعاوي : G_w، G_{w+1}، G_{w+2} ، G_{w+3} ، .... و هي كلها إفادات صحيحة تماماً عن الأعداد الطبيعية، كما يمكن ضمها كلها إلى نظامنا الصوري (باعتبارها بديهيات). وهذا النظام الجديد هو أيضا نظامي بكل معنى الكلمة، و يقودنا أيضاً إلى نظام جديد يشمل البديهيات كلها، و لكن هذا النظام أيضا له دعواه الغودلية ، ولتكن G_{w+w} التي يمكن أن نكتبها بطريقة أخرى G_{w2} و تبدأ العملية من جديد، و نحصل على لائحة

لانهائيــة جديــدة مــن البديهيــات، و لكنهــا نظاميـــة G_{w2} ، G_{w2+1} ، G_{w2+2}، ..إلخ. وهذه تقودنا أيضا إلى نظام جديد ، و إلى دعوى غودلية جديدة . G_{w3} و بعد تكرار العمل كله نحصل على G_{w4} ثـم G_{w5} و هكـذا . و هـذا العمـل الآن نظـامي تمامـاً و لـه دعـواه الغودليـة الخاصة. G_{w2}

ترى هل ينتهي هذا النهج عند نهاية معينة ؟ الجواب من بعـض النواحـي لا. ولكنـه يقودنـا إلى بعض الاعتبارات الرياضية الصعبة التي لا يمكن الخوض بتفصيلها هنا. و كان ألان تورنغ قد ناقش هذا النهج في بحث (4) نشره عام 1939. ومايلفت النظر في الواقع هو أن ***أي*** دعـوى في الحساب (شرط أن تكون مكممة بمكم شمولي)، يمكن الحصول عليها بنهج يتكرر فيـه تطبيـق فكرة غودل بهذا الأسلوب ! أنظر (1988 Feferman) على أن هذا يستدعي إلى حـد مـا طـرح مسألة الكيفية التي **نقرر بها في الواقع** صحة دعوى ما أو خطأها . و المشـكلة المحرجـة في كـل مرحلة هي إيجاد صياغة رمزية لإضافة طائفة لا نهائية مـن الدعـاوي الغودليـة في صيغـة بديهيـة إضافية واحدة (أو عدد منته من البديهيات) . الأمر الذي يتطلب أن يكون بالإمكان تصنيـف طائفتنا اللانهائية تصنيفاً منهجياً بطريقة من الطرق الخوارزمية. و هنا لكي نكون على يقين بأن تصنيفنا المنهجي لها يؤدي **بصورة صحيحة** ما يفترض فيه أن يؤديه، لا بد لنا مـن أن نلجـأ إلى ***بصيرة*** نافذة نطل بها من خارج النظام ــ و ذلـك علـى نحـو مـا فعلنـا بـالضبط لكـي نـرى أن $P_k(k)$ هي في المقام الأول دعوى صحيحة. فهـذه البصـيرة هـي مـا لا يمكـن تصنيفـه في نظـام منهجي ــ و هي ما لا بد أنه بعيد كل البعد عن أي فعل (أو سلوك) خوارزمي ! .

إن البصيرة التي قادتنا إلى أن دعوى غودل $P_k(k)$ إفادة صحيحة في الحســاب ، هـي مثـال عن نمط منهج عام يعرف عند المناطقة باسم **مبـدأ الارتـداد** reflection principle : ذلـك أن المرء يمكن أن يعود إلى **"معاني"** منظومة البديهيات و **قواعد** الإجراء ، و " يرتـد " عنهـا مقنعـا نفسه بــأن هـذه البديهيـات و القواعـد تـزوده بطـرق مشـروعة للوصـول إلى حقـائق رياضيـة، وبذلك يمكن أن يصبح قادرا على إدراج هذه البصيرة في صلب الإفادات الرياضية الــتي كـانت غير قابلة للاستنتاج من هذه البديهيات و القواعد نفسها [x] . ولقد كان اشتقاقنا لصحة $P_k(k)$ ، كما لخصناه أعلاه، مرتبطا بهذا المبدأ. كما يوجد مبدأ ارتداد آخر له صلة وثيقة بإثبات غـودل الأصلي (مع أنه غير مذكور أعلاه). و يتعلق هذا المبدأ باستنتاج حقائق رياضيـة مـن الحقيقـة التالية ، وهي أن النظام البديهي الذي اعتقدنا مسبقاً بأنه صالح للحصول علـى حقـائق رياضيـة هو فعلا نظام ***متسق***. ولكن على المرء أن يكون حذرا دائماً عنـد اسـتخدامه لمبـادىء الارتـداد هذه. لأنها غالباً ما تستخدم التفكير في مجموعات لا نهائية، مما يجعل المرء معرضاً للدنو من نمط استدلال قد يودي به إلى مفارقة من نمط مفارقة رسـل. أمـا إذا كـان المـرء حـذراً، فقـد تمكنـه

---

[x] إن الآلة (آلة تورنغ) التي تجسد معنى الخوارزمية لا يمكن أن تعود إلى معاني البديهيات. لذلك كانت هذه البصيرة هي من اختصاص عقل الإنسان. إلا أن هذه القناعة قد تكون وهماً في بعض الأحيان.

مبادىء الارتداد من القفز إلى ما وراء التخوم الصارمة لأي نظام صوري و الحصول عندئذ على رؤى رياضية جديدة لم تكن تبدو متاحة من قبل . فمبادىء الارتداد هي الأطروحة المضادة الحقيقية للتفكير الصوري . و يمكن إذن أن يوجد في أدبياتنا الرياضية الكثير من النتائج التي يمكن التسليم بها بكل معنى الكلمة، و التي تتطلب براهينها رؤى بعيدة عن بديهيات الأنظمة الصورية القياسية و قواعدها التي وضعت للحساب . و هذا كله يثبت أن الإجراءات العقلية التي يتوصل بها الرياضيون إلى أحكامهم عن الحقيقة - لا تكتفي بمد جذورها في اجراءات نظام صوري خاص بها فحسب ، فنحن نرى صحة دعوى غودل $P_k(k)$ على الرغم من أننا لا نستطيع اشتقاقها من البديهيات . إذ يتطلب نمط " الرؤية " المستخدم في مبدأ الارتداد بصيرة رياضية لا يمكن أن تكون نتيجة لعمليات خوارزمية بحتة يمكن التعبير عنها بطريقة رمزية في نظام رياضي صوري . وهذا موضوع سنعود إليه في الفصل العاشر.

قد يلاحظ القارىء وجود شبه بين الحجة التي تؤكد صحة $P_k(k)$ على الرغم من عدم إمكان البرهان عليها، والحجة التي تظهر مفارقة رسل. كما يوجد وجه شبه بينهما و بين حجة تورنغ في اثباته عدم وجود آلة تورنغ لحل مشكلة التوقف، وليست أوجه الشبه هذه مجرد أمر عرضي، بل توجد رابطة تاريخية قوية تربط بين الثلاثة. فقد وجد تورنغ استدلاله بعد دراسته لعمل غودل. كما أن غودل كان على علم بمفارقة رسل، و كان قادراً على تحويل هذا النوع من التفكير الظاهري التناقض، الذي وسع استخدام المنطق توسيعاً فائقاً [x] ، إلى برهان رياضي سليم. (كما أن جميع هذه الحجج ترتد أصولها إلى برهان كانطور القائم على " الشق القطري الذي سبق شرحه في الفصل السابق ص 118)[†].

ترى لماذا يترتب علينا قبول حجتي غودل و تورنغ، في حين أننا رفضنا التفكير الذي أدى برسل إلى مفارقته ؟ الحقيقية أن الحجتين الأوليتين أكثر وضوحاً بكثير، و لا يمكن أن يكونا موضع اعتراض بين الحجج الرياضية، في حين أن مفارقة رسل تعتمد على تفكير سديمي أكثر من سابقتيه و يسخر مجموعات " هائلة " جداً. و لكن يجب أن نعترف بأن التمييز ليس واضحاً حقاً بالصورة التي نتمناها. بل إن فكرة الصورية بكاملها قامت في الحقيقة بدافع قوي هو محاولة جعل هذا التمييز واضحاً. و تثبت حجة غودل أن وجهة نظر الصورية الصارمة ليست حقاً متماسكة الأجزاء، علاوة على أنها لا تقودنا إلى وجهة نظر بديلة موثوقة كلياً. فالقضية في

---

[x] وسعه فريجه و رسل في أواخر القرن الماضي و بداية الحالي.

[†] لقد رأى رسل في البدء أن برهان كانطور القائم على الشق القطري ضعيف لأنه ينطوي على ما يشبه الدائرة الفاسدة. إذ اعتبر الأعداد الحقيقية كلها مدرجة في اللائحة ثم عرف العدد بالشق القطري (الذي اعتبر ضمنا في اللائحة نفسها) ثم بين رسل في مفارقته كيف تؤدي الدائرة الفاسدة إلى تناقض.وهذا التناقض هو الذي اعتمد عليه غودل في حجته بأن $P_k(k)$ صحيحة على الرغم من أنه لا يمكن البرهان عليها.

رأيي لا تزال بلا حل . والإجراء الذي تبنته الرياضيات المعاصرة حالياً لتجنب نمط التفكير في مجموعات هائلة ، الذي أدى إلى مفارقة رسل ، هو إجراء غير مرض كلياً. هذا عدا عن أنه لا يزال ميالا للعرض بتعابير واضحة الصورية ــ أو بالأحرى بعبارات لا توحي لنا بثقة تامة بأننا لن نتعرض لتناقضات.

لذلك يبدو لي*، بالغاً ما بلغ حالنا هذا، أن حجة غودل تترتب عليها نتيجة واضحة، و هي أن مفهوم الحقيقة الرياضية لا يمكن تعليبه في مشروع صوري، أو أن الحقيقة الرياضية أبعد من أن تحتويها الصورية وحدها. وربما كان ذلك واضحاً حتى من دون نظرية غودل. إذ كيف لنا أن نعرف ما هي البديهيات و قواعد الإجراء التي يجب أن نتبناها في حالة ما ، عندما نحاول وضع نظام صوري ؟ إن دليلنا في تقرير القواعد التي يجب أن نتبناها، لا بد أن يكون دائماً فهمنا الحدسي لما " صحته واضحة من ذاتها ، " و ذلك بفرض أننا نعرف مسبقاً "معاني " رموز النظام. ثم كيف لنا أن نقرر أي الأنظمة الصورية هي الأنظمة المعقولة (أو بيت القصيد) التي علينا أن نتبناها ــ و ذلك وفقاً لما سبق و ذكرناه عما تمليه علينا مشاعرنا الحدسية حول "الوضوح الذاتي " و "المعاني " ــ و أي الأنظمة التي علينا رفضها ؟ إن فكرة الاتساق الذاتي ليست كافية حتماً للاختيار. فقد يكون أمامنا كثير من الأنظمة المتسقة ذاتياً و التي لا تكون، بهذا المعنى، معقولة، و التي تحمل البديهيات فيها وقواعد الإجراء معاني سنرفضها لأنها خاطئة، أو ربما لا معنى لها على الاطلاق . إن " الوضوح الذاتي " و " المعنى " هي مفاهيم سنظل دائماً بحاجة إليها، حتى من دون نظرية غودل.

ومع ذلك، كان يمكن أن نتصور، لولا نظرية غودل، أن فكرتي الوضوح الذاتي و المعنى الحدسيتين يمكن استخدامها لمرة واحدة فقط و إلى الأبد، و ذلك لكي نرسي في المقام الأول أسس النظام **الصوري**، ثم نستغني عنهما بعد ذلك باعتبارهما جزءاً من الإثبات الرياضي الواضح الذي لزم لتحديد الحقيقة. وعلى هذا و بحسب المفهوم الصوري، فإن هاتين الفكرتين الحدسيتين" الغامضتين" كان سيقتصر دوراهما على التفكير **التمهيدي** الذي يقوم به الرياضي ليكونا طرفا منه فحسب،و دليلاً يهديه نحو إيجاد الإثبات **الصوري** المناسب، و لكنهما لن يقوما بأي دور في البرهان الفعلي على الحقيقة الرياضية. فأتت نظرية غودل لتثبت أن وجهة النظر هذه ليست حقا هي الوجهة التي يمكن الأخذ بها في أي فلسفة أساسية للرياضيات. إن

---

* لقد وضعت طريقة للتمييز بين " المجموعات " Sets و " الأصناف "Classes فالمجموعات هي التي يباح تجميعها معاً لتكوين مجموعات أخرى أو ربما أصناف. أما الأصناف فلا يسمح تجميعها معاً في تجمعات من أي نوع أكبر منها، لأنها تعد " أكبر من أن تجمع بهذا الشكل .. إلا أنه لا توجد قاعدة لكي نقرر متى يسمح بأن يعد التجمع مجموعة و متى يجب أن يعد بالضرورة صنفاً فقط. هذا فيما عدا القاعدة الدائرية التي تنص على أن المجموعات هي التجمعات التي يمكن فعلاً أن تجمع معا لتكوين تجمعات أخرى.

فكرة الحقيقة الرياضية تذهب إلى أبعد من مفهوم الصورية بكامله. بل إن فيها لشيئا مطلقا و " هبة إلهية ". وهذا هو فحوى الأفلاطونية الرياضية، التي تحدثنا عنها في نهاية الفصل السابق. في حين أن أي نظام صوري خاص، يتميز بطبيعة عرضية و بأنه "من صنع الإنسان"ــ حقاً أن لهذه الأنظمة أدوارها التي تقوم بها في الدراسات الرياضية، ولكنها لا تزودنا إلا بدليل جزئي (أو تقريبي) إلى الحقيقة. أما الحقيقة الرياضية الواقعية فهي أبعد من مجرد بناء يصنعه الإنسان.

أفلاطونية أم حدسية ؟

ذكرت فيما سبق مدرستين متعارضتين لفلسفة الرياضيات ... ووقفت بشدة إلى جانب وجهة النظر الأفلاطونية بدلا من الصورية. و لكني أفرطت، في الحقيقة، في تبسيط الفروق بين المدارس، إذ يمكن أن نجد فروقا أدق و أكثر من ذلك بين وجهات النظر. من ذلك مثلاً أنه يمكن أن ينشأ جدل تحت راية " الأفلاطونية " بين من يقول إن لكائنات التفكير الرياضي "وجوداً " فعلياً، و من يقول إن مفهوم " الحقيقة " فقط هو الشيء المطلق . و لكننا لم نشأ هنا أن نجعل من هذا التفريق قضية. و في رأيي أن القول بأن الحقيقة الرياضية "مطلقة "، و كذلك القول بالوجود الأفلاطوني للمفاهيم الرياضية، هما في جوهرهما شيء واحد. فطبيعة "الوجود" التي يجب أن نسبغها على مجموعة مندلبروت مثلاً، هي سمة من طبيعتها " المطلقة " . و السؤال هل هذه النقطة من مستوي أرغان تنتمي إلى مجموعة مندلبروت أم لا هو مسألة مطلقة و مستقلة عن أي رياضي أو حاسوب يتمعن فيها. إن " استقلال الرياضي "عن مجموعة مندلبروت هو الذي يعطيها وجودها الأفلاطوني . أضف إلى ذلك أن أدق تفاصيلها أبعد من أن نتمكن من متابعتها بحواسيبنا . فهذه الآلات لا يمكن أن تمنحنا سوى الاقتراب من بنية لها وجودها القائم بذاته ، العميق و المستقل عن الحاسوب. ومع ذلك، إني أكن التقدير لوجهات نظر أخرى كثيرة ممكنة حول هذه المسألة يمكن أن يفكر المرء بتبنيها. و لكننا لن نحتاج إلى الاهتمام كثيرا هنا بهذه الخلافات.

و تختلف وجهات النظر كذلك في ظل الأفلاطونية باختلاف المدى الذي يمكن أن يدعم المرء فيه أفلاطونيته ــ إذا كان بالفعل أفلاطونياً. و قد كان غودل نفسه أفلاطونياً متشدداً جداً. على أن أنماط الإفادات التي كنت أنظر فيها حتى الآن، كانت " معتدلة " بحسب ما تسمح لنا الظروف (5). و لكن يمكن أن تظهر إفادات أكثر مثاراً للجدل، و لا سيما في نظرية المجموعات . و عندئذ قد يصادف المرء عند النظر في جميع تشعبات هذه النظرية ، مجموعات هائلة الاتساع و مبنية بطريقة سديمية غامضة لا يسع، حتى المصر من أمثالي على أفلاطونيته بصراحة ، إلا أن يساوره الشك عندئذ بأن وجودها ، أو غير ذلك من صفاتها، هو بالفعل شيء مطلق (6). إذ قد تأتي مرحلة تصبح فيها تعاريف المجموعات معقدة ملتبسة المفاهيم بصورة أن صحة الإفادات الرياضية المتعلقة بهذه التعاريف و خطأها تبدأ في اتخاذ صفة " مسألة

رأي شخصي " بدلا من أن تكون " هبة من الإله ". و لكن المجموعات (المنتهية أو غير المنتهية) التي ستعنينا هنا، هي ، بالمقارنة مع المجموعات التي أتينا على ذكرها الآن ، مجموعات هزيلة في ضآلتها. لذلك لن تعنينا الفروق كثيرا بين مختلف وجهات النظر الأفلاطونية ، فلا يهمنا مثلا هل المرء مستعد لأن يمضي في طريق أفلاطون إلى آخره مع غودل و يطالب بأن تكون صحة الإفادات الرياضية المتعلقة بتلك المجموعات الهائلة أو خطؤها، مطلقة دائماً أو شيئاً أفلاطونياً، أو أنه يتوقف في مكان ما قريب من ذلك الأول و لا يطالب بصفة الحقيقة المطلقة أو الخطأ إلا حين يمكن أن تبنى المجموعة بطريقة معقولة واضحة و ليست هائلة الاتساع و الشمول[x]. ولذلك لن تعنينا كثيرا هذه الفروق بين وجهات النظر الأفلاطونية المختلفة.

ومع ذلك يمكن النظر إلى المشكلة من وجهات نظر رياضية أخرى مثل تلك التي تعرف باسم **الحدسية**[*] **intuitionism** (وأخرى أيضا تعرف بالمنتهوية **finitism**) اللتان تذهبان إلى أقصى الطرف الآخر، إذ يرفض أتباعهما التسليم بوجود أي مجموعة لا نهائية، مهما كانت، وجوداً ناجزاً.[x] وكانت الحدسية قد نشأت عام **1924** على يد الرياضي الألماني براور L.E.J.Brouwer كبديل متميز عن الصورية ـ للخلاص من المفارقات (مثل مفارقة رسل) التي يمكن أن تظهر عند اللجوء إلى استخدام المجموعات اللانهائية بحرية كبيرة في التفكير الرياضي. وهي وجهة نظر تمتد جذورها إلى أرسطو الذي كان تلميذاً لأفلاطون، و لكنه رفض وجهة نظر هذا الأخير بشأن وجود الكائنات الرياضية وجوداً مطلقاً و بشأن التسليم بالمجموعات اللانهائية. و ترى الحدسية أن المجموعات (نهائية كانت أم لا نهائية) ليس لها وجود في ذاتها و إنما يجري التفكير فيها بلغة القواعد التي يمكن أن تعيِّن عناصرها.

ومن ميزات حدسية براور أنها ترفض " قانون الأوسط المبعد " الذي يؤكد أن إنكار نفي إفادة ما يكافيء تأكيد صحتها[+] (أو بالرموز $P \Leftrightarrow (\sim P)\sim$ وهي إحدى العلاقات التي مر ذكرها سابقاً). ولعل أرسطو ما كان ليسر بإنكار شيء واضح منطقياً كهذا ! فهذا القانون يمكن أن ينظر إليه من وجهة نظر " الحس السليم " بأنه حقيقة واضحة من ذاتها، لأنه يرى أنه إذا كان خطأ قولنا أن هذا الشيء غير صحيح، فلا بد عندئذ من أن يكون هذا الشيء صحيحاً (وهذا | كما نلاحظ | هو أساس الاستدلال الرياضي بطريقة " **نقض الفرض**"

---

[x] يسمى أصحاب هذه المدرسة الثانية "البنائيين **constructivists** "و هم لا يقرون مثلاً بوجود مجموعات لا نهائية إلا ما كانت تعرف طريقة بنائة.

[*] لقد دعيت الحدسية بهذا الاسم لأنه يفترض فيها أنها تعكس صورة فكر الإنسان

[+] مثال ذلك للبرهان على أنه " إذا قسمت مجموعة غير منتهية إلى مجموعتين فلا بد أن تكون إحداهما على الأقل غير منتهية ". نفرض غير ذلك . أي أن المجموعتين منتهيتان. و عندئذ تكونان معا مجموعة منتهية . وهذا غير ممكن لأن مجموعتنا غير منتهية (إذن أنكرنا النفي).

[راجع الصفحة 90]. غير أن الحدسيين يرون في أنفسهم المقدرة على إنكار هذا القانون. والسبب في ذلك بالأساس هو أنهم يتخذون من مفهوم الوجود موقفاً مغايراً لما يمليه الحس السليم، فهم لا يسلمون بوجود أي شيءرياضي وجودا فعلياً إلا إذا أعطوا طريقة محددة لبنائه (بناء عقلياً). و هكذا فإن " الوجود " عند الحدسي ، يعني " الوجود البنائي ". أما في البرهان الرياضي الذي يتبع طريقة " نقض الفرض " مثلاً ، فيفرض المرء عدة فرضيات لكي يثبت بعدئذ أنها تؤدي إلى تناقض، وهذا التناقض هو الذي يقدم الدليل المطلوب على خطأ الفرض الذي وضع موضع التساؤل . وقد يأخذ الفرض شكل إفادة تنص على أن الكائن الرياضي موضوع البحث المتصف بالصفات المطلوبة غير موجود، فإذا أدى هذا الفرض إلى تناقض ، استدل المرء عندئذ ، **في الرياضيات العادية الشائعة**، أن الكائن المطلوب موجود **فعلاً**. و لكن هذا الإثبات لا يعطينا هو نفسه وسيلة لبناء هذا الكائن الرياضي بناء فعلياً. لذلك، فإن هذا النوع من الوجود ليس وجوداً على الإطلاق عند الحدسيين . كما أنهم لهذا السبب ذاته يرفضون التسليم بقانون الأوسط المبعد و بطريقة نقض الفرض. وكان براور في الحقيقة غير راض من الأعماق بهذا " الوجود " غير البنائي (7). و كان يؤكد أنه لا معنى لمفهوم وجود ليس له طريقة فعلية لبنائه. و لا يحق للمرء ، في المنطق البراوري، أن يستنتج من بطلان عدم وجود شيء ما ، وجود هذا الشيء.

و في رأيي الخاص، أن هناك حقاً، شيئا يستحق التقدير في التماس العملية البنائية في الوجود الرياضي، إلا أن وجهة نظر براور كانت متطرفة جداً. فبراور كان قد عرض أفكاره هذه لأول مرة في عام 1924 أي بما ينوف على إحدى عشرة سنة قبل أعمال تشيرش و تورنغ : أي قبل أن يصبح من الممكن أن يدرس ذلك المفهوم عن العملية البنائية ضمن الإطار **التقليدي** للفلسفة الرياضية ــ و بدلالة فكرة تورنغ عن الحسوبية . حيث لم تعد ثمة حاجة الآن للمضي في التطرف الذي أراد براور أن يأخذنا إليه. إذ يمكننا أن نناقش العملية البنائية مثل أي قضية منفصلة عن مسألة الوجود الرياضي. و لكن إذا سايرنا الحدسية في تطرفها ، فعلينا عندئذ أن ننكر استخدام طرق قوية جداً في البرهان الرياضي، الأمر الذي يضيق الخناق على مجال عملنا و يجعله عقيما إلى حد ما.

لا أود أن أسهب في عرض مختلف المصاعب و أشكال العبث الظاهرية التي تقودنا إلى وجهة النظر الحدسية. و لكن قد يكون من المفيد الإشارة إلى بعض المسائل القليلة فحسب . منها مثلاً، المسألة التي غالبا ما أشار إليها براور نفسه، و هي تتعلق بالمنشور العشري للعدد : π
..... 3.141592653589793

ترى هل يوجد في مكان ما من هذا المنشور تعاقب عشرين سبعة متتالية أعني:

$\pi = 141592653589793\ \ldots.\ 77777777777777777777\ldots$

أم أنه لا يوجد ؟ إن كل ما نستطيع قوله في وضعنا الراهن، في لغة رياضياتنا الشائعة، هو أنـه : إما أن يوجد، وإما لا يوجد ـ و لا نعرف أيهما الصحيح . و هذه إفادة يبدو لي أنها لا تسـيء في شيء. إلا أن الحدسي يود في الحقيقـة أن ينكـر علينـا حـق إمكانيـة القـول " إمـا أن يوجـد تعاقب عشرين سبعة متتالية في مكان ما من منشور العشري، و إما أنه لا يوجد " ـــ اللهـم إلا بعد أن نكون : إما قد أثبتنا (بطريقة بنائية مقبولة عند الحدسيين) بأنـه يوجـد بـالفعل تعـاقب كهذا ، و إما قد أثبتنا أنه لا يوجد إطلاقاً ! إن الحساب المباشر يكفي أن يثبت وجـود تعـاقب من عشرين سبعة متتالية في مكان ما من منشور π العشري ، و لكن إثبـات عـدم وجـود مثـل هذا التعاقب يحتاج إلى نظرية رياضية من نوع ما. و لم يستمر أي حاسوب في العمل حتى الآن بما يكفي في حساب π لكي يحتم وجود هذا التعـاقب فعـلاً. و يمكـن أن نتوقـع، اعتمـاداً علـى أسس احتمالية، وجود هذا التعاقب فعـلاً، إلا أن الحاسـوب لـو تـرك يعمـل باسـتمرار ليعطـي بانتظام أرقاماً بمعدل 10^{10} رقماً مثلاً كل ثانية، لاحتاج على الأرجح إلى مدة تراوح بين حدود مئة عام و ألف عام لكي يجد هذا التعاقب ! و يبدو لي مـن المرجـح أكـثر مـن ذلـك بكثـير أن وجود هذا التعاقب سيبرهن عليه يوماً ما بطريقة رياضية بدلاً مـن حسـابه مباشـرة (وسـيكون هذا البرهان على الأرجح حصيلة نتيجة أقوى و أهم بكثير مما نعهـده) ـ و لربمـا، مـع ذلـك، بطريقة لا يقبل بها الحدســـيون !

إن هذا المثال، لم يعط هنا إلا لسهولة عرضه، و ليس له أي أهمية رياضية. و لو عرض على براور لأكد بحدسية المتطرفة أن قولنا في الوقت الراهـن : " يوجـد تعـاقب مـن عشـرين سـبعة متتالية في منشور π العشري " هو قول لا صحيح و لا خطأ. أمـا إذا أثبتـت فيمـا بعـد النتيجـة المناسبة بطريقة أو بأخرى ، بالحساب مثلا أو بالبرهان الرياضي (الحدسي)، فعندئـذ سـيصبح هذا القول " صحيحا " أو " خطأ " بحسب ما تكون النتيجة التي أثبتت. كما أن " نظرية فيرمـا الأخيرة " هي مثال مشابه لذاك . فهذه النظرية هي أيضـاً، بحسـب حدسـية بـراور المتطرفـة، لا صحيحة في الوقت الراهن و لاخطأ [x] ، و لكنها قد تصبح في يوم ما هذه أو تلـك. إلا أن هـذه الذاتية و تعليق الحقيقة الرياضية على الزمن هي في نظري شيء منفر، لأن تعليق إمكانية التسليم بنتيجة رياضية على متى سيبرهن عليها رسمياً، و هل سيبرهن أم لا، هو مسـألة ذاتيـة فعـلاً، ولا يجوز أن تعلق الحقيقة الرياضية على معايـير اجتماعيـة كهـذه . كمـا أن القـول بوجـود حقيقـة رياضية تتغير مع الزمن ، هو قول أقل ما يقال فيه إنه أكـبر بـاعث علـى النفـور وعـدم الرضـى بالنسبة للرياضيات التي نأمل منها أن تكون موضع ثقة نستطيع استخدامها بطمأنينة في وصـف

---

[x] إلا إذا ثبت ما سبق أن ذكرناه عن وجود برهان محتمل على صحتها الآن، راجع الحاشية ص 89.

العالم الفيزيائي. و لكن ليس كل الحدسيين يتخذون مواقف متشددة مثل براور. ومع ذلك تتصف وجهة النظر الحدسية بأنها مزعجة حتى بالنسبة لأولئك الذين يتعاطفون مع الأهداف البنائية. و الرياضيون الذين يسايرون الحدسية اليوم بكل جوارحهم هم قلة، على الأقل لأنها تحد كثيراً من التفكير الرياضي المتاح لهم.

لقد أوجزت فيما سبق التيارات الرئيسية الشائعة اليوم في فلسفة الرياضيات : الشكلية (أو الصورية)، و الأفلاطونية، والحدسية. و لم أحاول أبداً أن أخفي ميولي، وبأني أميل بشدة إلى وجهة النظر الأفلاطونية القائلة إن الحقيقة الرياضية مطلقة و خارجية و أزلية ، و لا تقوم على معايير من صنع الإنسان، و أن الأشياء الرياضية أيضاً لها وجود في ذاتها خارج عن الزمن، و لا علاقة لها بالمجتمع الإنساني و لا بالأشياء الفيزيائية الخاصة. و لقد حاولت أن أجعل الدفاع عن وجهة النظر هذه قضيتي في هذا المقطع، وفي المقطع السابق، وكذلك في نهاية الفصل الثالث. و آمل من القارىء أن يكون مستعداً للمضي معي على هذا الأساس في معظم الطريق، لأن ذلك سيكون مهماً بالنسبة للكثير مما سنلاقيه فيما بعد.

نظريات غودلية النمط تتحدر من نتيجة تورنغ

لقد أغفلت في عرضي لنظرية غودل عدة تفاصيل، و لم أتعرض لما لعله كان من الناحية التاريخية أهم قسم في برهانه، و أعني به ذاك القسم الخاص بـ " لا بتوتية " اتساق البديهيات†. ولم يكن غرضي هنا الالحاح على " قضية قابلية البرهان على اتساق البديهيات " على الرغم من أهميتها البالغة بالنسبة إلى هلبرت ومعاصريه، و إنما لأبين بأن ثمة دعوى غودلية خاصة ستبدو صحتها واضحة للعيان بعد إمعان النظر ببصيرتنا في معاني العمليات ذات العلاقة ــ مع أنها لا هي قابلة للبرهان Provable باستخدام بديهيات النظام الصوري المعتمد وقواعده، ولا هي قابلة للدحض (دحوضة)Disprovable.

وقد ذكرت فيما سبق أن تورنغ كان قد طور برهانه الأخير الخاص الذي يثبت فيه لا حلولية مسألة التوقف بعد دراسته لعمل غودل . و الحقيقة أن هناك أشياء كثيرة مشتركة بين البرهانين، و أنه يمكن أن نستمد مباشرة من استخدام استدلال تورنغ، جوانب تفتح لنا الطريق إلى نظرية غودل. فدعونا نرى كيف يتم ذلك. فمنه نحصل على رؤية مختلفة نوعاً ما لما هو كامن خلف نظرية غودل.

ولا بد أن تتوافر في كل نظام رياضي صوري خاصة أساسية هي أنه، إذا كانت أمامنا سلسلة من الرموز و علينا أن نقرر هل هذه السلسلة هي برهان على توكيد أمر معين أم لا، فإن مسألة هذا التقرير يجب أن تكون مسألة حسوبة. والنقطة الأساسية في صياغة البرهان

† لنتذكر أن " لا بتوتية " تعني عدم القابلية للبت (و هنا لا يمكن البت في الاتساق أي لا يمكن البرهان عليه و لا على عدمه) .

الرياضي صياغة صورية تكمن كلها في نهاية الأمر، في عدم إهمال أي حكم يجب القيام به حول ما هو الاستدلال المشروع وما هو الاستدلال غير المشروع.و لا بد أن يكون في استطاعتنا في آخر الأمر أن نتحقق بصورة آلية كاملة، وبطريقة محددة سلفاً، هل هذا البرهان المفروض هو برهان حقاً أم لا، بمعنى أنه لا بد من وجود **خوارزمية** لتدقيق البراهين. ولكننا لا نطالب من جهة أخرى بأن تكون مسألة إيجاد برهان على إفادات رياضية مقترحة (أو دحضها) مسألة يجب أن تكون خوارزمية بالضرورة.

ولكن في الواقع، يثبت في النهاية أن هناك دائماً خوارزمية لإيجاد البرهان المطلوب في حال وجوده في أي نظام صوري. لأننا يجب أن نفرض عندئذ أن نظامنا مصوغ صياغة صورية بلغة رمزية، وأن هذه اللغة يمكن أن نعبر عنها بأبجدية منتهية من الرموز. فدعونا نرتب، كما أسلفنا، سلاسل الرموز **ترتيباً معجمياً**، الأمر الذي يهدينا **بطريقة أبجدية**، كما نذكر، إلى أي سلسلة ذات طول معين . إذ تؤخذ السلاسل التي طولها يساوي الواحد و ترتب أول كل شيء، و يليها تلك التي طولها إثنان ثم تلك التي طولها ثلاثة و هكذا (ص 143). و هكذا تتكون لدينا جميع البراهين المبنية بناءاً صحيحاً و المرتبة عددياً وفقاً لهذا المخطط المعجمي. و الآن لما كانت لدينا لائحة بالبراهين، فستكون لدينا أيضاً لائحة بنظريات النظام الصوري. وذلك لأن النظريات هي بالتحديد الدعاوي التي تظهر في السطور الأخيرة من البراهين المبنية بناء صحيحاً. ومن الواضح أن جدولة البراهين و النظريات هي عملية حسوبة بكل معنى الكلمة، لأننا نستطيع أن نستعرض في هذه اللائحة المعجمية **جميع** سلاسل الرموز في النظام ، سواء ما كان منها برهاناً فعلياً له معناه، أم لا. و هكذا نختبر السلسلة الأولى بخوارزمية اختبار البراهين لكي نرى هل هي برهان، و نمسحها إن لم تكن كذلك، ثم نختبر السلسلة الثانية بالطريقة نفسها، ونمسحها إن لم تكن كذلك. ثم ننتقل إلى الثالثة فالرابعة و هكذا. ففي حال وجود البرهان المطلوب، لا بد لنا من العثور عليه في مكان ما من هذه اللائحة.

فلو أن هلبرت كان **قد** نجح في إيجاد نظامه الصوري ـ أي في إيجاد منظومة بديهيات و قواعد إجراء، تكفي قوة بنيانها لأن نستطيع أن نقرر في ضوئها، و ببرهان صوري، صحة أو خطأ أي دعوى رياضية مصوغة صياغة صورية صحيحة داخل النظام ـ لكانت لديه عندئذ طريقة خوارزمية عامة يستطيع أن يقرر بها صحة أي دعوى كهذه. و لكن لماذا يستطيع ذلك؟ لأننا إذا عثرنا أخيراً بالطريقة المبينة أعلاه على الدعوى التي نبحث عنها و وجدناها في السطر الأخير من برهانها، نكون عندئذ **قد برهنا** عليها. و إذا عثرنا أخيراً بدلاً من ذلك على **نفيها** في السطر الأخير، نكون عندئذ **قد دحضناها**. و لو كان مشروع هلبرت كاملاً، لظهر عندئذ دائماً (أي في حال أي دعوى) هذا الإمكان أو ذاك من الامكانين (٢ إذا كان مشروعه متسقاً، لا يمكن أن يظهرا كلاهما معاً أبداً)، و لاختتم إجراؤنا الآلي دائماً بهذا الشكل في مرحلة ما، و لكان لدينا خوارزمية عامة نستطيع أن نقرر بها صحة أو عدم صحة أي دعوى

من دعاوي النظام . بل لكان ذلك مخالفاً لنتيجة تورنغ التي عرضناهـا في الفصـل الثـاني و الـتي تقول إنه لا يوجد خوارزمية عامة نستطيع أن نبت بواسطتها في دعاو رياضية. إذن فقـد برهنـا بهذه الصورة، في واقع الأمر، على نظرية غودل القائلة إنه لا وجود لمشروع، من النمـط الـذي قصده هلبرت يمكن أن يكون كاملاً بالمعنى الذي سبق أن اعتمدناه.

إن نظرية غودل في واقع الأمر، أكثر تخصصاً من هذا، لأن نمط النظام الصوري الـذي كـان غودل مهتماً به، كان يريده أن يكون كافياً لدعـاوي الحسـاب فقـط، لا لدعـاوي الرياضيـات بوجه عام. فيا ترى هل نستطيع أن نتدبر الأمر لكي تنفذ آلات تورنغ جميـع عملياتهـا اللازمـة باستخدام الحساب فقط ؟ أو لعرض ذلك بطريقة أخـــرى: هل يمكن التعبير عن جميع الدوال **المحسوبة** التابعة لأعداد طبيعية (و أعني بها الدوال الكـــرورة Recursive أو الخوارزمية، الـتي هي نتائج أداء آلة تورنغ لعملها) بلغة الحساب العادي ؟ في واقع الأمر، يكـاد يكـون صحيحـاً أننا نستطيع ذلك، و لكن ليس كما ينبغي تماماً. لأننا نحتاج إلى عملية إضافية علينـا أن نضمهـا إلى القواعد المتعارف عليها في الحساب والمنطق (.بما في ذلك المكمان $\exists$ و$\forall$). وكل ما تقوم به هذه العملية هو اختيار: " أصغر عدد طبيعي x تكون معه K (x) صحيحة"

حيث ( ) K هي أي دالة دعوية معطاة يمكن حسـابها بطريقـة حسـابية ـــ هـذا مـع افتراضنـا (طبعاً) أنه يوجـد لأجلهـا عـدد كهـذا، أعـني يوجـد x تكـون (x) K لأجلـه صحيحـة. أي] $\exists x \; [K(x)]$ (لو لم يوجد عدد كهذا، لظلت العملية " جارية بـلا توقـف " * محاولـة أن تستقر عند العدد x المطلوب و لكن غير الموجود).

ومهما يكن من أمر. فإن البرهان السابق يثبت، استناداً إلى نتيجة تورنغ، أن برنامج هلبرت الساعي إلى تحويل سائر فروع الرياضيات إلى حسابات داخل نظام صوري هـو في واقـع الأمـر برنامج متعذر.

إن هذا النهج على ما هو عليه، لا يثبت حالاً بأن لدينا دعوى غودليـة (مثـل $P_k(k)$ ، لا يمكن البرهان عليها مع أنها صحيحة. إلا أننا لو تذكرنا البرهان الذي عرضناه في الفصل الثـاني على كيفية " تفوقنا على خوارزمية معينة " (راجـع ص 95) لرأينـا أن بإمكاننـا أن نقـوم بعمـل يشبهه كثيراً. ففي ذلك البرهان السابق استطعنا أن نثبـت أنـه إذا كـان لدينـا خوارزميـة نقـرر بواسطتها هل سيتوقف عمل إحدى آلات تورنغ، فإننا نستطيع أن نجد عملاً لهذه الآلة نرى أنه لا يتوقف، على الرغم من أن الخوارزمية التي لدينا لا تستطيع أن تتنبأ بذلك (ولنذكر هنـا أننـا أحلينا على أن الخوارزمية يجب أن تعلمنا بصورة صحيحة متى **سيتوقف** عمـل آلـة تورنـغ على

* لابد في الواقع من ترك مثل هذه الإمكانات المؤسفة أن تظهر لكي يكون لدينا عندئـذ إمكـان التعبير عـن أي عملية خوارزمية. و لنذكر هنا أنه لكي نصف آلات تورنغ بوجه عـام، لا بـد لنـا مـن أن نحمـل معهـا آلات تورنـغ الـتي لا تتوقف أبداً.

الرغم من أن الخوارزمية نفسها قد تفشل أحياناً في إعلامنا بأن عمل آلة تورنغ لن يتوقف ــ أي يظل جارياً وحده بلا توقف). و هكذا لدينا إذن دعوى لا يختلف وضعها عن الوضع الذي عبرت عنه سابقاً نظرية غودل. بمعنى أنها دعوى يمكن أن نرى ببصيرتنا بأنها لا بد أن تكون دعوى **صحيحة** (وهو عدم توقف عمل آلة تورنغ) و لكن العمل الخوارزمي المعطى لا يمكن أن ينبئنا بذلك.

المجموعات العدودة تكراريا [x]

يمكن أن نلجأ، لعرض المقومات الأساسية لنتائج تورنغ و غودل، إلى طريقة بيانية يعبر عنها بلغة **نظرية المجموعات**، الأمر الذي يجنبنا وصفها بأنظمة صورية أو بلغات رمزية اعتباطية مخصصة لهذا الغرض. فتتضح بذلك أمامنا القضايا الأساسية بجلاء. و لكن لن نأخذ لهذا الغرض سوى مجموعات (منتهية أو غير منتهية) من الأعداد الطبيعية 0 , 1 , 2 , 3 , 4, ... و هكذا لن ندرس سوى تجمعات من هذه الأعداد مثل {4 , 5 , 8} أو {0, 100,57 003} أو {6} أو {0} أو {0 , 1, 2 , 3 , 4, ..., 9999} أو {1 , 2 , 3 , 4,.....} أو {0 , 2 , 4 , 6 , 8 ,...} أو مجموعة الأعداد الطبيعية كلها N= { 0, 1, 2 , 3 , 4 ,... } أو المجموعة الخالية { } = ϕ ولن نعنى إلا بمسائل **الحسوبية**، أي التي من الشكل "ما هي أنواع مجموعات الأعداد الطبيعية التي يمكن توليدها، و التي لا يمكن توليدها، بخوارزميات ؟ "

لمعالجة هذه القضايا، يمكننا إذا شئنا، أن نتصور أن كل عدد طبيعي n يشير إلى سلسلة خاصة من الرموز المتفق عليها في نظام صوري معين . فيمكن القول إن هذه السلسلة، ولنشر إليها بـ Q_n ، هي السلسلة . التي ترتيبها n وفقاً لترتيب معجمي معين للدعاوي (المعبر عنها تعبيراً " نحوياً صحيحاً ") داخل النظام. و هكذا يمثل كل عدد طبيعي دعوى من هذه الدعاوي. فمجموعة دعاوي النظام الصوري كلها تصبح ممثلة كما تمثل المجموعة N بكاملها. فيمكن تصور **نظريات** النظام الصوري بأنها تكون مجموعة أصغر من مجموعة الأعداد الطبيعية و لنسمها P و لا تهمنا على كل حال تفاصيل أي نظام خاص اتبع لترقيم الدعاوي، بل كل ما نحتاجه، لإقامة علاقة بين الأعداد الطبيعية و الدعاوي ، هو وجود خوارزمية معروفة للحصول على أي دعوى Q_n (مكتوبة بالتدوين الرمزي المناسب) من العدد الطبيعي الموافق لها، ووجود خوارزمية أخرى معروفة لكي نحصل علىn من Q_n. فإذا افترضنا أن هاتين الخوارزميتين قد أصبحتا معروفتين لدينا، نصبح أحراراً في أن نطابق مجموعة الأعداد الطبيعية N مع مجموعة الدعاوي في نظام صوري خاص.

لنفرض الآن أننا اخترنا نظاماً صورياً متسقاً وواسعاً بما يكفي لأن يشمل جميع أعمال آلات تورنغ كلها ـ وأنه إضافة إلى ما سبق " معقول " بمعنى أن بديهياته و قواعد الإجراء فيه

[x] أي المجموعات التي يمكن أن نعدد عناصرها الواحد بعد الآخر (بطريقة تكرارية).ولكن المؤلف سيتجاوز هذه الناحية ويطلق هذه التسمية على أعداد غير عدودة، وهذا ما سينوه له في ص 163.

هي أمور يمكن الأخذ بها باعتبار أن "**صحتها** واضحة من ذاتها ". **فبعض** دعـاوي هـذا النظـام Q_1 , Q_2 , Q_3 , Q_4 , Q_5 .....لها بالفعل **براهينها** داخل النظام. و هذه الدعـاوي (الـتي يمكـن البرهان عليها) لها طبعاً أرقام تكون مجموعة (جزئية) منN ، وهي في الحقيقة مجموعـة نظريـات النظام التي رمزنـا لهـا بـــP . و لقـد رأينـا بـالفعل قبـل الآن أنـه يوجـد في أي نظـام صـوري خوارزمية لتوليد جميع الدعاوي القابلة للبرهان مع براهينها،الواحدة تلـو الأخـرى (فكمـا بينـا قبل الآن ، يمكن الحصول خوارزمياً على البرهان Π_n من n . و كل ما علينا فعله هو النظر إلى السـطر الأخـير في هـذا البرهـان النونـي لكـي نجـد الدعـوى النونيـة القابلـة للبرهـان في النظـام الصوري، أعني " النظرية " النونية) فلدينا إذن خوارزمية لتوليد عنـاصر P الواحـد تلـو الآخـر (وقد يكون هناك تكرار ــ و لكن لا أهمية لذلك) .

نسمي كل مجموعة مثل P يمكن توليدها بخوارزمية على هذا النحو، مجموعة عدودة تكرارياً. وهكذا فإن مجموعـة الدعاوي الدحوضة (أي التي يمكن دحضها) الموجــودة في هـذا النظـام ــ وأعنـي بها الدعاوي التي يكون نفيها قابلاً للبرهان داخل النظام ـــ هـي مثـل سـابقتها عـدودة تكرارياً، لأننا نستطيع ببساطة أن نعدد جميع الدعاوي القابلة للبرهان بأخذ منافياتها جميعاً حتى النهاية، ولا تقتصر المجموعات الجزئية العدودة تكرارياً من N على هاتين، بل يوجد غيرها كثـير مما لا نحتاج إلى معرفة النظام الصـوري المعـني لكي نعرِّفهـا. ومـن الأمثلـة البسـيطة علـى هـذه المجموعات ، مجموعة الأعداد الزوجية (الشفعية)

{ 0 , 2 , 4 , 6 , 8 ,...... }

ومجموعة مربعات الأعداد الطبيعية:

{ 0 , 1 , 4 , 9 , 16 , 52,.... }

و بمجموعة الأعداد الأولية:

{ .... , 13 , 11 , 7 , 5 , 3 , 2 }

ومن الواضح أن هذه المجموعات كلها يمكن توليدها بخوارزميات. كما أن المجموعة المتممة لكل من هذه المجموعات ــ أي مجموعة الأعداد الطبيعية التي لا تنتمـي إلى المجموعـة الأصليـة ـــ هـي أيضاً مجموعة عدودة تكرارياً. و أما المجموعات المتممـة للمجموعـات الثـلاث السـابقة فهـي:

{ 1 , 3 , 5 , 7 , 9,....... }

{ 2 , 3 , 5 , 6 , 7 , 8 , 10,...... }

{0 , 1 , 4 , 6 , 7 , 8 , 9 , 10 , 12 ,...... }

ولن يصعب علينا إيجاد خوارزمية أيضاً لهذه المجموعات المتممة. لأننا نستطيع أن نقرر فعـلاً بطريقة خوارزمية وضع كل عدد طبيعي n ، هل هو زوجي أم لا ، أو هل هو مربع تـام أم لا ، أو هل هو أولي أم لا. و هذا ما يزودنا بخوارزمية لتوليد *كلا* المجموعتـين : الأصليـة و متممتهـا، لأننا نستطيع أن نتبع الأعداد الطبيعية تباعاً، و نقـرر وضـع كـل عـدد بـدوره، هـل ينتمـي إلى المجموعة الأصلية أم إلى متممتها. وتسـمى المجموعـة الـتي تتميز بأنهـا هـي و متممتهـا تتصفـان

بأنهما عدودتان تكرارياً بمجموعة ***كرورة***. فمن الواضح (بحسب هذا التعريف) أنه إذا كانت المجموعة كرورة فإن متممتها كرورة.

لنتساءل الآن. هل توجد مجموعات عدودة تكرارياً من دون أن تكون كرورة ؟ دعونا نفترض في بادىء الأمر أن ذلك ممكن لكي نتبين مالذي يترتب عليه. لنفرض أن لدينا مجموعة من هذا القبيل تتولد عناصرها بخوارزمية، وأن لدينا عنصراً نشتبه بوجوده في المجموعة، فإذا فرضنا مبدئياً أن هذا العنصر في المجموعة فعلاً، فعندئذ يكون لدينا وسيلة نتحقق بها من ذلك، و هي أن نجعل خوارزميتنا تتفحص جميع عناصر المجموعة إلى أن تجد في نهاية الأمر العنصر الخاص الذي نتحرى أمره. أما إذا لم يكن العنصر المشبوه موجوداً في المجموعة فعلاً فعندئذ لن تفيدنا الخوارزمية في شيء على الإطلاق، لأنها ستظل تتفحص العناصر باستمرار من دون أن تصل إلى قرار نهائي. لذلك لا بد لنا من خوارزمية لتوليد المجموعة المتممة. فإذا عثرت هذه الخوارزمية على عنصرنا المشبوه، عندئذ نكون على يقين بأن هذا العنصر ليس في المجموعة (وإنما في متممتها). و هكذا لن يصلح الحال إلا بالخوارزميتين معاً. إذ ما علينا عندئذ إلا أن نبادل بين الخوارزميتين فنعثر على العنصر المشبوه بهذا أو بذاك. ولن نجد هذا الوضع الموفق على كل حال ، إلا إذا كانت المجموعة كرورة . أما في حالنا هنا فقد فرضنا أن المجموعة عدودة تكرارياً فحسب و لكنها ليست كرورة، لأن الخوارزمية المطلوبة لتوليد المجموعة المتممة غير موجودة! و هكذا نجد أنفسنا أمام هذا الوضع الطريف الذي نستطيع أن نقرر فيه بصورة خوارزمية أن العنصر موجود فعلاً في المجموعة ــ هذا إذا كان هو في الأصل عنصراً فيها. ولكننا لا نستطيع أن نضمن بأننا سنقرر بواسطة أي خوارزمية، وضع العناصر التي يصادف أن ***لا تكون*** في الأصل في المجموعة.

ترى هل يمكن أن نصادف مثل هذا الوضع الطريف ؟ و هل يوجد فعلا مجموعات عدودة تكرارياً من دون أن تكون كرورة ؟ و ماذا عن المجموعة P. ؟ هل هي كرورة ؟ لقد رأينا أن P عدودة تكرارياً، فعلينا الآن أن نقرر هل متممتها عدودة تكرارياً أيضاً. في الواقع لا. ولكن كيف نؤكد ذلك ؟ لا بأس، إن من المفروض كما نذكر أن تكون الأعمال التي تقوم بها آلات تورنغ، عمليات مشروعة في نظامنا الصوري. فإذا أشرنا إلى آلة تورنغ التي ترتيبها n بـ T_n ، عندئذ تكون الإفادة " T_n (n) تتوقف " هي دعوى يمكن أن نجد لها تعبيراً في نظامنا الصوري في حال عدد طبيعيn ، وسنشير إليها بالكتابة S (n) . فهذه الدعوىS (n) ستكون صحيحة عند بعض قيم n و باطلة عند قيم أخرى . إن مجموعة الدعاوي S (n) ***كلها*** حين تمر n بجميع الأعداد الطبيعية، 0 ,1 ,2 , 3 , ... ستمثلها مجموعة جزئية S من N ، و الآن لنتذكر أن النتيجة الأساسية التي توصل إليها تورنغ (الفصل الثاني ص 90)، هي أنه لا توجد خوارزمية تؤكد أن T_n (n) " لا تتوقف " ــ في الحالات التي تكون فيها T_n (n) لا تتوقف فعلاً. وهذا يثبت أن مجموعة الدعاويS (n) الباطلة ليست عدودة تكرارياً

وهنا نلاحظ أن جزء S الواقع في P هو بالضبط تلك الدعاويS (n) الصحيحة. والسبب في ذلك، حتماً، هو أن أي دعوى خاصة S (n) يمكن البرهان عليها، يجب أن تكون صحيحة

(لأننا افترضنا أن منظومة البديهيات و قواعد الإجراء في نظامنا كلها معقولة). وعلى هذا فإن الجزء الذي يقع في P منS يجب أن يتكون كله من دعاو S (n) صحيحة، علاوة على أنه لا يمكن أن توجد دعوىS(n) **صحيحة** خارجP . لأنه إذا كانت $T_n(n)$ تتوقف فعلاً، فعندئذ يمكن أن نجد برهانا داخل النظام على أنها ستتوقف فعلاً *.

لنفرض الآن أن متممة P عدودة تكرارياً. عندئذ يجب أن يكون لدينا خوارزمية لتوليد عناصر هذه المجموعة المتممة. فنستطيع أن نجعل هذه الخوارزمية تعمل، و نشير بإشارة ما إلى كل دعوى S (n) نصادفها. إن المجموعة الجزئية من S (n) التي نصادفها هي مجموعة جميع الدعاويS(n) الباطلة، و هكذا سيعطينا نهجنا في واقع الأمر تعداداً تكرارياً لمجموعة الدعاوي S(n) الباطلة. ولكننا ذكرنا فيما سبق أن هذه المجموعة **ليست** عدودة تكرارياً. فهذا التناقض يثبت بأن متممة P لا يمكن أن تكون في النتيجة عدودة تكرارياً. و عليه فإن **المجموعة P ليست كرورة**. و هذا ما كنا نبحث عن إثباته.

إن هذه الخواص تبرهن في واقع الأمر أن نظامنا الصوري لا يمكن أن يكون **كاملاً**، بمعنى أنه لا بد أن توجد دعاو لا يمكن البرهان عليها و لا على نفيها داخل النظام. لأنه لو لم توجد دعاو " لا بتوتة " من هذا القبيل، لكانت المجموعة المتممة لـ P هي مجموعة الدعاوي **الدحوضة** (إذ إن كل دعوى لا يمكن البرهان عليها ، يجب أن تكون عندئذ دحوضة). و لكن سبق أن رأينا أن الدعاوي الدحوضة تكون مجموعة عدودة تكراريا ، مما يجعل P كرورة. إلا أن P ليست كرورة ــ و هذا تناقض يثبت بأن نظامنا غير كامل. و هذه هي إذن الطعنة الرئيسية التي وجهتها نظرية غودل إلى النظم الصورية.

والآن ما قولنا بالمجموعة الجزئية T من N التي تمثل الدعاوي الصحيحة[x] من نظامنا الصوري؟ هل T كرورة؟ هل هي عدودة تكرارياً ؟. وهل متممة T عدودة تكرارياً ؟. إن الجواب عن جميع هذه الأسئلة في الواقع هو" لا ". و يمكن أن نرى ذلك بطريقة بسيطة، و هي أن نلاحظ أن الدعاوي الباطلة التي من الشكل "Tn (n) تتوقف" لا يمكن أن تتولد، كما رأينا سابقاً، بخوارزمية. لذلك لا يمكن أن تتولد الدعاوي الباطلة **كلها** بخوارزمية. لأن أي خوارزمية كهذه، لو وجدت، لقامت بتعداد جزء منها و هو جميع الدعاوي الباطلة التي لها الشكل السابق "T_n (n) تتوقف". وقياساً على ذلك فإن مجموعة الدعاوي **الصحيحة** كلها لا يمكن أن تتولد بخوارزمية (لأن أي خوارزمية كهذه يمكن تعديلها بمنتهى البساطة لكي تولد جميع الدعاوي الباطلة، إذ لا يحتاج ذلك إلا إلى جعله يعطي نفيَ كل دعوى تولدها). لذلك لما كانت الدعاوي الصحيحة غير عدودة تكرارياً (ومثلها أيضاً الدعاوي الباطلة)، فهي تشكل صنفاً

* يمكن أن يتكون البرهان في الحقيقة من تعاقب مراحل تعكس العمل الذي تقوم به الآلة وهي تتابع نشاطها إلى أن تقف. فيكتمل البرهان حالما تتوقف الآلة.

x ليس من الضروري أن تكون الدعاوي الصحيحة قابلة للبرهان.

أعقد و أعمق بكثير من الدعاوي القابلة للبرهان داخل النظام. وهذا ما يبرز بوضوح جوانب من نظرية غودل، وهي أن مفهوم **الحقيقة** الرياضية لا يذعن إلا جزئياً لوسائل البرهان الصوري.

ومع ذلك توجد بعض الأصناف البسيطة من الدعاوي الحسابية الصحيحة التي تشكل مجموعات عدودة تكرارياً. مثال ذلك ، لنأخذ الدعاوي الصحيحة التي من الشكل:

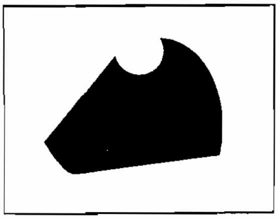
$$\exists\, w, x, y, \ldots, z\, [\, f(w, x, \ldots, z) = 0\,]$$

حيث( )f دالة مبنية من عمليات حسابية مألوفة هي الجمع و الطرح و الضرب و الرفع إلى قوة. إن هذه الدعاوي تشكل، كما نرى دون صعوبة، مجموعة (سأشير إليها بالرموز A) عدودة تكرارياً (8). ولدينا نموذج دعوى من هذا القبيل ـ وإن كنا لا نعرف هل هو صحيح — هو نفي " نظرية فيرما الأخيرة " التي لأجلها يمكن أن نأخذ ( )f معرفة بالصيغة:

$$f(w, x, y, z) = (x+1)^{w+3} + (y+1)^{w+3} - (z+1)^{w+3}$$

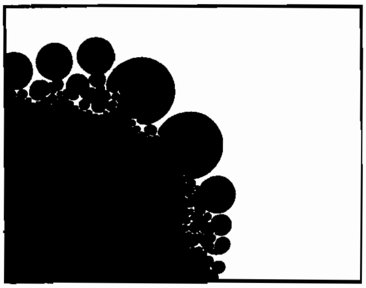
ومع ذلك، فقد ثبت، أن المجموعة A ليست كرورة (ولكن ليس من السهل إثبات ذلك — على الرغم من أنه نتيجة لبرهان غودل الأصلي فعلاً). لذلك لسنا مزودين بأي وسيلة خوارزمية يمكنها أن تقرر، ولو مبدئياً، حقيقة" نظرية فيرما الأخيرة " أو نفيها!

ولقد حاولت في الشكل 4 ــ 1 أن أمثل مجموعة كرورة بطريقة تخطيطية، فرسمت منطقة ذات حدود بسيطة وواضحة، و يستطيع المرء أن يتصور فيها بأن مسألة التحقق من انتماء نقطة معينة إلى المجموعة أو عدمه هي مسألة تحل مباشرة. كما يمكن أن نعتبر أن كل نقطة من الصورة تمثل عددا طبيعياً [x]. و عندئذ تتمثل المجموعة المتممة أيضاً بمنطقة بسيطة المظهر. أما في الشكل 4 ــ 2 فقد حاولت أن أمثل مجموعة عدودة تكرارياً و لكنها ليست كرورة. و قد مثلتها في صورة مجموعة ذات حدود معقدة. حيث من المفروض أن تبدو المنطقة الواقعة على أحد جانبي الحدود ــ و التي تمثل الجانب العدود تكرارياً ــ أبسط من منطقة الجانب الآخر. ولكن علي أن أنوه إلى أن الشكلين أوليان جداً و لم يقصد منهما بأن يكونا، بأي معنى، " دقيقين هندسياً ". وأخص بالذكر أنه لا يجوز إعطاء أي معنى خاص لكوننا مثلنا هذين الشكلين كأنهما جزءان من مستو منبسط ذي بعدين.

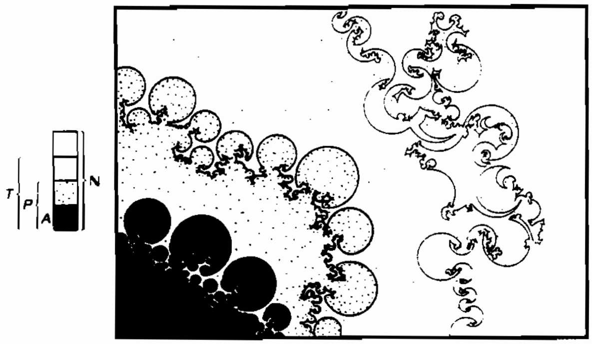


الشكل 4 ــ 1: تمثيل تخطيطي أولي جدا لمجموعة كرورة

[x] لا يمكن طبعا أن تمثل كل نقطة عدداً طبيعياً مختلفاً عن غيره، لأنه لا وجود لتقابل بين نقط أي مساحة (مهما صغرت)، و مجموعة الأعداد الطبيعية. ولكن المقصود في الشكل هو أن المحيط المغلق في الشكلين يحد مجموعة عدودة (أعدادا طبيعية مثلاً).



الشكل 4 ـ 2 : تمثيل تخطيطي أولي جداً لمجموعة عدودة تكرارياً (المنطقة السوداء) ولكنها ليست كرورة والفكرة من الشكل هي أن المنطقة البيضاء ليست معرفة نقطة فنقطة و إنما هي مجمل " مايبقى " عندما تزال المنطقة السوداء المولدة بطريقة حسوبة: كما أنه لا توجد طريقة حسوبة للتأكيد بأن نقطة ما من المستوي هي من المنطقة البيضاء (لأن الشك يظل قائماً دائماً بأن المنطقة السوداء قد تمتد إليها).



الشكل 4 ـ 3 : تمثيل تخطيطي أولي جداً لمجموعات مختلفة من الدعاوي . فالمجموعة P التي هي مجموعة الدعاوي القابلة للبرهان (أو النظريات) في النظام الصوري المعتمد مثلها مثل A عدودة تكرارياً، ولكنها ليست كرورة و المجموعة T التي هي مجموعة الدعاوي الصحيحة، ليست حتى عدودة تكرارياً.

وقد أشرت في الشكل 4 ـ 3 بصورة تخطيطية كيف تقع المجموعات الثلاثP و T وA داخل المجموعة N.

هل مجموعة مندلبروت كرورة ؟

لا بد أن تتصف المجموعات غير الكرورة بالتعقيد، و أن يكون تعقيدها أساسياً حتى ليتحدى إن صح القول جميع الجهود المبذولة حيال التصنيف المنهجي. فلولا هذا التعقيد لأدى هذا التصنيف نفسه إلى منهج خوارزمي مناسب لها. ولا توجد للمجموعة اللاكرورة طريقة خوارزمية عامة لكي نقرر هل ينتمي عنصر معين (أو نقطة) لهذه المجموعة أم لا . و لقد شهدنا في بداية الفصل الثالث مجموعة معقدة أشد التعقيد . و أعني بها مجموعة مندلبروت. فعلى

الرغم من السهولة المدهشة الظاهرة في قواعد تعريفها، فإن المجموعة نفسها تظهر تنوعاً لا حدود له في بنية فائقة التعقيد . فهل من الممكن يا ترى أن تكون هذه المجموعة مثالاً عن المجموعات اللاكرورة الماثلة حقاً أمام أعيننا الزائلة ؟.

ولكن قد نتساءل أيضاً، أليست الحواسيب الإلكترونية هي عنوان العمل الخوارزمي نفسه؟ ومع ذلك لن يلبث القارىء أن يلاحظ أن الفضل يعود إلى هذه الحواسيب في أنها هي التي استحضرت بسحرها و سرعتها الفائقة صورة هذا النموذج من التعقيد لكي تشاهده أعيننا. و هذا صحيح في الواقع بكل تأكيد. و لكن يجب أن لا ننسى أبداً الطريقة التي ينتج بها الحاسوب هذه الصور في الواقع . فهو حين يختبر وضع نقطة من مستوي أرغان — أي عدد عقدي c — لكي يتبين هل تنتمي إلى مجموعة مندلبروت (الملونة بالأسود) أم إلى المجموعة المتممة لها (الملونة بالأبيض) يبدأ الحاسوب بالصفر 0، و عندئذ يطبق التطبيق.

$$z \longrightarrow z^2 + c$$

على $z = 0$ فيحصل على c ، ثم يطبقه على $z = c$ فيحصل على $c^2 + c$ ، ثم يطبقه على $c^2 + c$ فيحصل على $c^4 + 2c^3 + c^2 + c$ وهكذا. فإذا ظلت هذه المتتالية $0, c, c^2+c, c^4 + 2c^3 + c^2 + c$ محدودة، عندئذ تُلوّن النقطة التي يمثلها، باللون الأسود، و إلا لونت بالأبيض. وكيف تتحقق الآلة أن هذه المتتالية ستظل محدودة ؟ إن هذا السؤال يتطلب مبدئيا معرفة ما الذي يحدث بعد عدد لا **نهائي** من حدود المتتالية ! وهذه مسألة ليست بحد ذاتها حسوبة. و لكن توجد لحسن الحظ طرق للتأكيد، بعد عدد محدود فقط من الحدود، بأن المتتالية أصبحت غير محدودة. (و الواقع، حالما تصل النقطة إلى الدائرة التي نصف قطرها 2 والتي مركزها المبدأ، فعندئذ يمكن أن يتأكد المرء أن المتتالية غير محدودة).

و هكذا فإن **متممة** مجموعة مندلبروت (أعني المنطقة **البيضاء**) هي، بمعنى ما، عدودة تكرارياً، وإذا وجد عدد عقديc في المنطقة **البيضاء**، عندئذ توجد خوارزمية تؤكد هذه الحقيقة. و لكن هل مجموعة مندلبروت نفسها — أي المنطقة السوداء — عدودة تكرارياً؟ أو إذا كانت نقطة ما مشبوهة موجودة فعلاً في المنطقة السوداء فهل توجد عندئذ خوارزمية تعلمنا بذلك بصورة أكيدة؟ يبدو أن الجواب عن هذا السؤال غير معروف في الوقت الراهن (9). وقد استشرت في ذلك شتى الزملاء و الخبراء فلم أجد بينهم من يبدو أنه على علم بخوارزمية كهذه، كما لم يصادفوا أي برهان على أن هذه الخوارزمية غير موجودة. فيبدو على الأقل إذن أن لا وجود لخوارزمية **معروفة** لهذه المنطقة السوداء ، و أن متممة مجموعة مندلبروت ربما كانت فعلاً مثالاً عن المجموعة العدودة تكرارياً و لكن غير الكرورة.

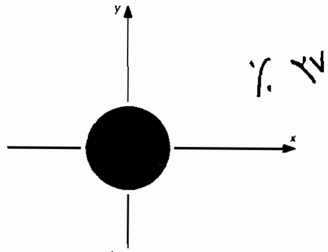
لا بد لي قبل المضي في استكشاف هذا الرأي الأخير، من أن أحدد معالم بعض القضايا التي كنت قد مررت بها مروراً سريعاً. فهذه القضايا ستكون لها، بالنسبة لنا، بعض الأهمية في مناقشتنا القادمة للحسوبية في الفيزياء. والواقع أني انحرفت إلى حد ما عن الصواب في مناقشتي

السابقة، فقد طبقت تعابير مثل " عدودة تكراريا " و "كرورة "على مجموعات من النقط في مستوي أرغان، أعني على مجموعات من الأعداد العقدية في حين أن هذه التعابير يجب أن يقتصر استخدامها على الأعداد الطبيعية أو على المجموعات الأخرى **القابلة للعد**. و قد رأينا في الفصل الثالث (ص 118) أن الأعداد الحقيقية غير قابلة للعد، و كذلك الأعداد العقدية ، فهي أيضاً غير قابلة للعد ــ لأن الأعداد الحقيقية، يمكن أن تعد نوعاً خاصاً من الأعداد العقدية، و أعني أنها أعداد عقدية انعدم فيها القسم التخيلي (راجع ص 122). **والواقع أنه توجد أعداد** عقدية " بقدر ما " توجد بالضبط أعداد حقيقية ، أي يوجد منها " c " (لكي نثبت علاقة واحد لواحد بين الأعداد العقدية و الأعداد الحقيقية ، يمكن أن نأخذ بصورة أولية جداً، المنشور العشري لكل من القسمين الحقيقي و التخيلي في كل عدد عقدي و بعدئذ تشبك أرقامهما الزوجية المرتبة بالفردية المرتبة فنحصل على عدد حقيقي مقابل كل عدد عقدي . فمثلاً العدد العقدي:

....512.975 i + ... 03.6781 يقابله العدد الحقيقي (....50132.6977851)

توجد طريقة لتجنب هذه المشكلة أي مشكلة عدم قابلية الأعداد الحقيقية والعقدية للعد وهي أن نتحدث فحسب عن الأعداد الحسوبة. فقد رأينا في الفصل الثالث أن الأعداد الحقيقية الحسوبة ــ ومنه إذن الأعداد العقدية أيضاً ــ تكون مجموعة قابلة للعد. ولكن توجد في ذلك صعوبة كبيرة، إذ لا توجد في الواقع خوارزمية عامة تقرر وجود تساو بين عددين حسوبين أعطي كل منهما بخوارزميته الخاصة (في الحقيقة يمكن أن نكون الفرق بينهما بطريقة خوارزمية، و لكن لا يمكننا أن نقرر بطريقة خوارزمية (عامة) هل هذا الفرق يساوي الصفر . لنتصور مثلاً خوارزميتين تولدان الأرقام .... 0.99999 و الأرقام .... 1.00000 على التوالي . و لكننا لا نستطيع أن نعرف أبداً هل ستستمر التسعات في الأول و الأصفار في الثاني إلى ما لانهاية له، بحيث يكون العددان متساويين، أم أن هناك أرقاما أخرى ستظهر في النهاية و أن العددين إذن غير متساويين. و لذلك لا يمكن أن نعرف أبدا هل هذان العددان متساويان أم لا. و يترتب على ذلك أنه حتى لو كان لدينا مجموعة بسيطة مثل **القرص الواحدي** (الذي نصف قطره 1) في مستوي أرغان (أي مجموعة النقط التي بعدها عن المبدأ لا يتجاوز واحدة الطول، أعني المنطقة السوداء في الشكل 4 ــ 4) فلن يكون لدينا خوارزمية نستطيع أن نقرر بواسطتها هل يقع عدد عقدي معين على القرص أم لا. و لا تظهر هذه المشكلة بالنسبة للنقط الواقعة داخل القرص (أو بالنسبة للنقط الواقعة خارجه) . ولكنها تبرز في حالة النقط الواقعة على حافة القرص نفسها ــ أعني على الدائرة الواحدية نفسها التي اعتبرناها جزءاً من القرص. أو بطريقة أبسط ، لنفرض أن لدينا خوارزميا يولد أرقام القسمين الحقيقي و التخيلي من عدد عقدي معين . فإذا اشتبهنا بأن هذا العدد العقدي واقع حقاً على الدائرة الواحدية، فإننا لن نستطيع بالضرورة تأكيد هذه الحقيقة، ذلك لأننا لا نملك خوارزمية نقرر بواسطتها هل العدد

الحسوب $x^2 + y^2$ يساوي **الواحد** فعلاً أم لا - علماً أن تحقق هذه المساواة هو المعيار الذي يقرر وقوع العدد العقدي الحسوب $x + iy$ على الدائرة الواحدية .



الشكل **4 ـ 4** : يجب أن يعد القرص الواحدي " كروراً " بالتأكيد و لكن ذلك يتطلب وجهة نظر خاصة تناسبه

و لكن بصراحة، ليس هذا ما نريده. فالقرص الواحدي، **لا بد** أن يعد (لبساطته) كروراً بكل تأكيد، إذ ليس هناك ما هو أبسط منه إلا القليل. فقد نلجأ إلى **تجاهل** المحيط كطريقة للالتفاف حول المسألة. و عندئذ، بالنسبة للنقط الواقعة فعلاً داخل القرص أو خارجه، ثمة حتماً خوارزمية تؤكد هاتين الحقيقتين في حال وقوعهما (وكل ما علينا هو أن نولد أرقام المقدار $x^2 + y^2$ الواحد تلو الآخر، فنعثر أخيراً على رقم غير الرقم 9 بعد الفاصلة في 0.99999 ....أو على رقم غير الصفر في ....1.00000). فالقرص الواحدي بهذا المعنى كرور، و لكن الرياضيات تجد مشقة في السير في هذا الطريق، لأن عليها اللجوء عندئذ غالباً إلى تدبيج براهين تتعلق بما يحدث عند الحدود، أما بالنسبة للفيزياء فقد تكون وجهة النظر هذه (القائلة بكرورية القرص) ملائمة لها . ومع ذلك سنحتاج إلى إعادة النظر في هذه القضية مرة ثانية فيما بعد.

و يمكن أن يتبنى المرء وجهة نظر أخرى قريبة الصلة جداً بالسابقة، ولكنها لا تشير إلى أعداد عقدية حسوبة على الإطلاق. فبدلاً من أن نعدد فيها الأعداد العقدية الموجودة داخل المجموعة التي هي موضوع البحث، أو خارجها، نبحث ببساطة عن خوارزمية نقرر بواسطتها انتماء العدد العقدي المعطى إلى المجموعة أو إلى متممتها. وأقصد بالعدد العقدي " المعطى "، العدد الذي تعطى لنا أرقام قسميه الحقيقي و التخيلي الواحد تلو الآخر ، و على قدر ما نريد ــ حتى و لو بطريقة سحرية ، و لا نطالب بوجود أي خوارزمية معروفة أو غير معروفة **لتقديم** هذه الأرقام. وتعد مجموعة من الأعداد العقدية عندئذ " عدودة تكرارياً" إذا وجدت خوارزمية واحدة تستطيع (كلما عرض عليها عدد عقدي بأرقامه المتتالية الواحد بعد الآخر بالطريقة السابقة) أن تقول بعد عدد محدود من المراحل " نعم" إذا و فقط إذا كان العدد العقدي ينتمي فعلاً إلى المجموعة . و يتبين لنا من ذلك أن وجهة النظر هذه كسابقتها الأولى "تتجاهل " الحدود. و على هذا يعتبر داخل القرص الواحدي، وكذلك خارجه، مجموعتين عدودتين تكرارياً، في حين أن الحد نفسه (محيط القرص) لا يعتبر كذلك.

ولكني لا أرى بوجه الإجمال، و بصورة واضحة، أن أياً مـن وجهـتي النظـر السـابقتين هـي وجهة النظر التي نحتاجها حقاً (10)، فقد نستغني عن كثير من التعقيد في مجموعة مندلـبروت إذا نحن طبقنا عليها فلسفة " تجاهل الحدود". لأن هذه المجموعة تتكون جزئياً من " **بقع** " ـ مناطق لها " داخل " ـ وجزئياً من " استطالات ". والتعقيد يكمن أشده فيما يبـدو لي في الاسـتطالات التي تكثر فيها الالتواءات والتعرجات. إلا أن هذه الاستطالات سيتم "تجاهلها " إذا تبنينا أياً من الفلسفتين السابقتين، لأنها لا تقع (في نظرهما) داخل المجموعة. ومع ذلـك لا يـزال مـن غـير الواضح بالنسبة لنا إن كانت مجموعة مندلبروت " كـرورة " حتـى إن لم نـأخذ في الحسـبان إلا البقـع . و هكـذا يبـدو أن السـؤال المتعلـق بـإحدى المخمنـات غـير المبرهنـة المتصلـة بمجموعـة مندلبروت سيظل معلقاً، و أعني به هل هـذه المجموعـة هـي مـا يدعـى " المـترابط محليـاً " ؟ لـن أتعرض هنا لشرح معنى هذا التعبير أو لصلتـه بموضوعنـا . و إنمـا أود فحسـب أن أشـير إلى أن هذه القضايا شائكة، وأنها تثير مسائل لا تزال بغير حل، وتتعلـق بمجموعـة مندلـبروت، بـل إن بعضها يأتي في مقدمة الأبحاث الجارية حاليا في الرياضيات.

وهناك أيضاً وجهات نظر أخرى يمكن أن يتبناهـا المـرء لكـي يتجنـب مشـكلة عـدم قابليـة الأعداد العقدية للعد، وهي أن يختار منها مجموعة جزئية مناسبة تتصـف بـأن التحقـق فيهـا مـن تساوي عددين أو عدمه هي مسألة حسوبة، وهذا بدلا من النظـر في مجموعـة الأعـداد العقديـة **كلهـا**. ومـن المجموعـات الجزئيـة البسـيطة الـتي يمكـن اختبارهـا، مجموعـة الأعـداد العقديـة " **الناطقة**"، أي الأعداد التي تؤخذ أقسامها الحقيقية و أقسامها التخيليـة أعـدادا ناطقـة. ولكـني لا أعتقد بأن وجهـة النظـر هـذه تقـدم أو تؤخـر شـيئاً بالنسـبة لحالـة الاسـتطالات في مجموعـة مندلبروت، و ذلك لكونها ضيقة جداً. و قد تكون مجموعة **الأعـداد الجبريـة** مقبولـة أكـثر إلى حد ما ـ أي مجموعة الأعـداد العقديـة الـتي هـي حلـول للمعـادلات الجبريـة الـتي أمثالهـا أعـداد صحيحة. من ذلك مثلاً جميع حلول المعادلة:

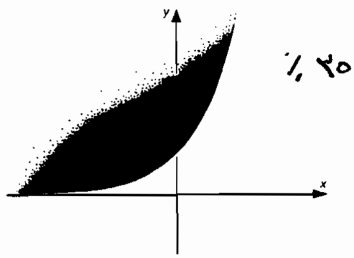
$$129z^7 - 33z^5 + 7252z^4 + 16z^3 - 2z - 3 = 0$$

هي أعداد جبرية. والأعداد الجبرية حسوبة وقابلة للعد، عـلاوة علـى أن مسـألة تقريـر تسـاوي عددين منها (أو عدمه) هي مسألة حسوبة . (فالكثير منها يثبت أنـه يقـع علـى تخـوم الدائـرة الواحدية وعلى استطالات مجموعة مندلبروت) . لذلك يمكن أن نعبر بدلالـة هـذه الأعـداد إذا شئنا عن سؤالنا هل مجموعة مندلبروت كرورة أم لا.

مـن الجـائز أن تكـون الأعـداد الجبريـة مناسـبة في حالـة المجموعتـين السـابقتين (مجموعـة مندلبروت، وقرص الدائرة)، و لكنها في الحقيقة لا تحل جميع مشاكلنا بوجـه عـام. منهـا مثـلاً مجموعة النقاط المعرفة بالعلاقة:

$$y \geq e^x$$

حيث x و y هما احداثيا النقطة $x + iy$ (= z) في مستوي أرغـان وهـذه المنطقـة ممثلـة في الشكل 4 ـ 5 بالمنطقة السوداء.



الشكل 4 ـ 5 : يجب أن تعد المجموعة المعرفة بالعلاقة $y \geq e^x$ كرورة أيضاً.

إن داخل هذه المجموعة و داخل متممتها كلاهما عدودتان تكرارياً وفقاً لأي مـن وجهـات النظر التي بيناها أعلاه، و لكن الحد (أي المنحني الممثل بالعلاقة $y = e^x$) لا يشمل سوى نقطـة جبرية **واحدة**، وأعني بها النقطة $z = i$ (حيث $x = 0$ و $y = 1$)[x] كما أثبتته النظريـة الشـهيرة للندمان عام 1882. فالأعداد الجبرية، في هذه الحالة، لن تساعدنا على اكتشاف طبيعة الحد (أي المنحني) الخوارزمية. ولن يكون من العسير علينا إيجاد صنف جزئي آخر من الأعـداد الحسـوبة التي تكفي في هذه الحالة الخاصة. و لكننا لن نستطيع أن نصل بالمرء إلى درجـة الشـعور القـوي بأنه وصل إلى وجهة النظر الصحيحة.

بعض الأمثلة عن الرياضيات غير الكرورة

توجد في الرياضيات مجالات عديدة تظهـر فيهـا مسـائل غـير كـرورة ، لذلـك قـد نتعـرض لصنف من المسائل التي يكون الجواب في كل حالة منها إمـا " نعـم " و إمـا " لا "، و لكـن لا يوجد لأجلها خوارزمية عامة لكي نقرر أياً من هاتين الإجابتين هي الموافقة فعلاً. والطريـف أن بعض أصناف هذه المسائل تلفت النظر في **مظهرها** البسيط.

لننظر أولاً في مسألة إيجاد حلول صحيحة لمنظومة معادلات جبرية أمثالهـا أعـداد صحيحـة. تعرف هذه المعادلات باسم معادلات ديوفانتية (نسبة إلى الريـاضي اليونـاني ديوفـانتوس الـذي عاش في القرن الثالث قبل الميلاد ، و درس معادلات من هذا القبيـل). ويمكـن أن تكـون هـذه المعادلات.

$$z^3 - y - 1 = 0 \quad , \quad yz^2 - 2x - 2 = 0 \quad , \quad y^3 - 2xz + z + 1 = 0$$

والمسألة هي أن نقرر : هل تحل هذه المعادلات بإعطاء قيم صحيحة لمتغيراتها x و y و z؟ . في الحقيقة يوجد حل في هذه الحالة الخاصة و هو:

[x] إذا كانت x عدداً جبرياً a مختلفاً عن الصفر، تكون y عندئذ هي حل للمعادلة $y - e^a = 0$ وهذه المعادلة ليسـت جبرية ، إذن y ليس جيرياً (وبالعكس إذا كان y جبريا مختلفا عن الواحد تكون x غير جبرية).

$$x = 13 \quad , \quad y = 7 \quad , \quad z = 2$$

ولكن لا توجد خوارزمية عامة تبت في هذه المسألة مهما تكن مجموعة* المعادلات الديوفانتية المعطاة . و هذا يعني أن الحساب الديوفانتي هو قسم من الرياضيات اللا خوارزمية، على الرغم من طبيعة مقوماته البسيطة الأولية!

(يوجد مثال أقل بساطة من سابقه بقليل ، و هو المكافىء التوبولوجي لمتعدد الجوانب topological equivalence of manifolds. وسأذكر ذلك باختصار فحسب لوجود صلة واضحة بينه و بين القضايا التي سأناقشها في الفصل الثامن. و لكي نفهم ماالمقصود من متعدد الجوانب، لنأخذ أولا مثال العروة المشكلة في وتر. إن هذه العروة هي متعدد جوانب **ذو بعد** واحد. ولنأخذ الآن مثال االسطح المغلق (سطح كرة مثلاً). فهذا السطح هو متعدد جوانب **ذو بعدين**. وبعدئذ لنحاول أن تتخيل نوعاً من " السطح " الذي يمكن أن يكون له **ثلاثة** أبعاد أو أكثر. إن التكافؤ التوبولوجي بين متعددي جوانب يعني أنه يمكن تغيير شكل أحدهما باستمرار، أي من دون تمزيق أو التصاق، حتى يتحول إلى الآخر. و هكذا فإن السطح الكروي و سطح المكعب متكافئان توبولوجياً، في حين أنهما معا غير مكافئين لسطح حلقة أو فنجان شاي ــ و هذان الشكلان الأخيران يكافىء كل منهما الآخر توبولوجيا. وتوجد بوجه عام خوارزمية تقرر تكافؤ أو عدم تكافؤ متعددي جوانب لهما بعدان ــ وتقوم هذه الخوارزمية على تعداد عدد " المماسك " أو العروات في كل منهما (فيجب أن يتساوى العددان). ولا نعرف حتى كتابة هذه الأسطر إجابة عن هذه المسألة في حالة متعددي جواب لهما ثلاثة أبعاد . أما في حالة أربعة أبعاد فأكثر **فلا** توجد خوارزمية تقرر التكافؤ. وليس صعباً أن نتصور وجود صلة لحالة الأبعاد الأربعة بالفيزياء، لأن المكان والزمان يكونان معاً، بحسب نسبية أينشتين العامة، متعدد جوانب رباعي الأبعاد (أنظر الفصل الخامس ص 252). و قد رأى جيروش Geroch و هارتل Hartle في عام 1987 أنه من الجائز أن تكون هناك صلة لهذه اللاخوارزمية " بالثقالة الكمومية" (راجع أيضا الفصل الثامن).

والآن، دعونا ننظر في مسألة من نوع مختلف تدعى **مسألة الكلمات** (11). ففي هذه المسألة نفرض أن لدينا أبجدية من الرموز، و أننا كونا من هذه الرموز متتاليات مختلفة ندعوها **كلمات**. ولكن لسنا بحاجة لأن يكون لهذه الكلمات معنى ما، و إنما سنفرض أن لدينا لائحة (محدودة) من المساويات بين هذه الكلمات، و أنه يحق لنا استخدامها لاشتقاق " مساويات " جديدة منها. ويتم ذلك بالتعويض في داخل الكلمة نفسها عن جزء منها بالكلمة التي تساويه

* وهذا يجيب سلباً عن مسألة هلبرت العاشرة التي مر ذكرها في الصفحة 61 (أنظر مثلاً Devlin 1988). إن عدد المتغيرات هنا غيرمعقد . إلا أنه من المعروف أن الأمر لا يحتاج فعلاً إلى أكثر من تسعة لكي تظل هذه الخاصة اللاخوارزمية موجودة.

بحسب اللائحة . و عندئذ تصبح المسألة هي أن نقرر بشأن كلمتين معطاتين هل هما متساويتان وفقا لهذه القواعد أم لا.

وعلى سبيل المثال ، قد تكون لدينا اللائحة الابتدائية التالية من المساويات:

EAT = AT

ATE = A

LATER = LOW

PAN = PILLOW

CARP = ME

فيمكن أن نشتق من هذه المساويات المساواة التالية مثلاً:

LAP = LEAP

وذلك بإجراء التعويضات التالية التي نستفيد فيها من اللائحة الابتدائية. سنجد من المساواة الثانية ثم الأولى ثم الثانية مرة أخرى أن:

LAP = LATEP = LEATEP = LEAP

لنفرض الآن المسألة التالية، إذا كان لدينا كلمتان فهل يمكن الانتقال من إحداهما إلى الأخرى .بمجرد تنفيذ مثل هذه التعويضات؟ فمثلاً، هل يمكن الانتقال من CATERPILLAR إلى MAN، أو مثلاً من CARPET إلى MEAT ؟ سنجد أن الجواب عن الحالة الأولى هو " نعم " في حين أنه " لا " عن الثانية . والطريقة النظامية لإثبات صحة الإجابة في حالة " نعم " هي أن نعرض سلسلة من المساويات التي نحصل فيها على كل كلمة من إحدى سابقاتها باستخدام إحدى العلاقات المشروعة (اللائحة المعطاة) . و هكذا نجد:

CATERPILLAR = *CA*RPILLAR = CARPILL**ATER** = **CARPIL*LOW*** =

CARP*AN* = *ME*AN = **ME*ATE*N** = **M*ATE*N** = **M*A*N**

(ولنلاحظ هنا أن الأحرف التي ستتغير مكتوبة بالخط الأسود الداكن، و الأحرف التي تغيرت مكتوبة بالأحرف المائلة). و الآن كيف يمكن أن نؤكد استحالة التحول من CARPET إلى MEAT بواسطة القواعد المشروعة ؟ إن الأمر يحتاج هنا إلى تبصر بعض الشيء، و لكن ليس عسيراً أن نرى بأن هناك طرقاً مختلفة لذلك، يظهر أن أبسطها هو التالي : نلاحظ أن عدد مرات تكرار الحرفA زائدا عدد مرات تكرار الحرف Wزائدا عدد مرات تكرار الحرف M متساو في كل جانب من جانبي اللائحة الابتدائية. ولذلك فإن عدد مرات تكرار الحرف A مع W مع M لا يمكن أن يتغير في أي عمليات تعويض متتالية. في حين أن هذا العدد في CARPETهو 1، أما في MEAT فهو 2 ولذلك لا يوجد طريقة للتحول من CARPET إلى MEAT بالطرق المشروعة.

لنلاحظ أننا نستطيع ببساطة إثبات " التساوي" بين كلمتين، بإبراز سلسلة الأحرف الصورية المشروعة التي لا تستخدم فيها سوى القواعد المفروضة لدينا. أما إذا أردنا اثبات " عدم التساوي" فعلينا أن نلجأ إلى إثباتات لها **صلة** بالقواعد المفروضة لدينا (وغير ظاهرة فيها مباشرة). أو بالأحرى، يمكن أن نستخدم خوارزمية واضحة لإثبات تساوي كلمتين إذا كانتا فعلاً " متساويتين ". وكل ما نحتاج إليه عندئذ هو تكوين جميع المتتاليات الممكنة للكلمات، ثم إدراجها في قائمة معجمية، وبعدئذ ننتزع منها أي متتالية يوجد فيها كلمتان متعاقبتان لا تنتج إحداهما مباشرة من سابقتها بقاعدة مشروعة. فالمتتاليات التي تبقى، تعطينا جميع المساويات الممكنة التي نبحث عنها بين الكلمات. ولكن لا توجد بوجه عام، خوارزمية واضحة كهذه لكي نقرر بواسطتها متى تكون كلمتان مفروضتان **غير** متساويتين. فليس أمامنا عندئذ إلا اللجوء إلى " الذكاء " لكي نثبت هذا الأمر. (ففي حالة الكلمتينCARPET و MEAT ، احتجت في الحقيقة إلى بعض الوقت لكي ألاحظ تلك "الحيلة " أعلاه لكي أثبت عدم تساويهما. و قد نحتاج في مثال آخر إلى حيلة أخرى . أما في حالة إثبات وجود "تساو" فقد يصادف أن يكون الذكاء مفيدا أيضا ـ إلا أنه ليس ضروريا (إذ يمكن أن يقوم حاسوب بهذه المهمة).

في الواقع إذا عدنا إلى اللائحة **الخاصة** الأولية المؤلفة من خمس مساويات مدرجة في الحالة السابقة، نجد أنه لم يكن عسيراً جداً إيجاد خوارزمية تؤكد " عدم تساوي " كلمتين (خاصتين) في حال " عدم تساويهما " فعلاً. ولكن لا بد لنا من ممارسة شيء من الذكاء لكي نجد خوارزمية تعمل في هذه الحالة. أما في الواقع فإنه لا توجد خوارزمية واحدة يمكن أن تستخدم بوجه عام **لجميع** الخيارات الممكنة التي يمكن أن نختار بها لائحتنا الابتدائية. لذلك لا يوجد من هذه الناحية حل خوارزمي لمسألة الكلمات ، أو بمعنى آخر إن مسألة الكلمات العامة هي من جملة الرياضيات اللا كرورة!

توجد أيضاً بعض اللوائح الخاصة الابتدائية المختارة (بحذق)، والتي لا توجد لأجلها خوارزمية تقرر متى تكون كلمتان من كلماتها غير متساويتين . و من هذه اللوائح تلك المدرجة أدناه:

AH = HA

OH = HO

AT = TA

OT = TO

TAI = IT

HOI = IH

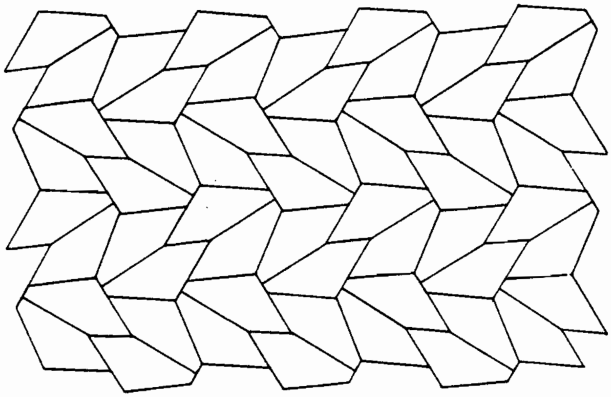
THAT = ITHT

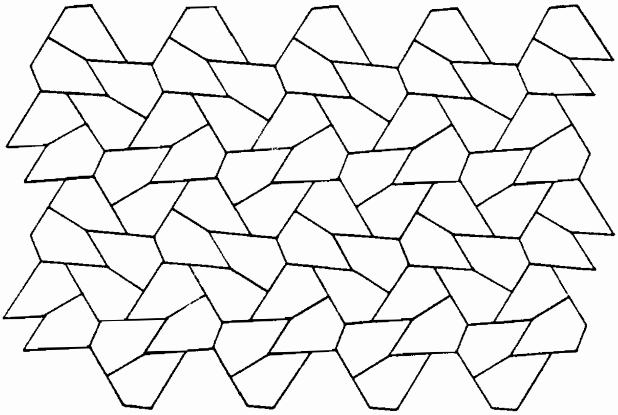
(لقد اقتبست هذه اللائحة من لائحة عرضها في عام1955 G.S.Tesitim و Dana Scott أنظر Gardner 1958ص 144). مثلاً : إن هذه المسألة الخاصة في الكلمات هي **بذاتها** مثال عن الرياضيات اللاكرورة، بمعنى أننا لا نستطيع أن نقرر باستخدام هذه اللائحة الخاصة الابتدائية، وجود* أو عدم وجود "مساواة" بين كلمتين معينتين من كلماتها بصورة خوارزمية.

لقد انبثقت "مسألة الكلمات"العامة من اعتبارات تتعلق بصياغة المنطق الرياضي صياغة شكلية (راجع "الأنظمة الشكلية"...كالتي رأيناها في البدء) فاللائحة الابتدائية تقوم بدور منظومة البديهيات، كما تقوم قواعد تبديل الكلمات بدور قواعد الإجراءات الصورية. أما البرهان على لاكرورية مسألة الكلمات فينتج من هذه الاعتبارات.

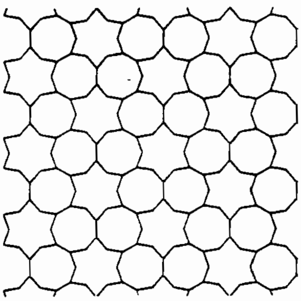
لننظر الآن في آخر مثال نراه عن المسائل اللاكرورة في الرياضيات، وهو مسألة تغطية المستوي الإقليدي بعدد محدود من أشكال المضلعات . ففي هذه المسألة يكون لدينا عدد منته من أشكال المضلعات، والمطلوب معرفته هو هل من الممكن تغطية المستوي بأكمله بهذه الأشكال فقط من دون أن نترك فيه فجوات (ليس لها تغطية) ومن دون أن نركب بعض الأشكال فوق بعض ؟ إن ترتيب الأشكال بهذه الطريقة نسميه **تبليط Tiling** المستوي. من ذلك أننا نعرف جميعاً بأن هذا التبليط ممكن باستخدام مربعات فقط، أو مثلثات متساوية الأضلاع فقط أو مسدات منتظمة فقط (وهذه الحالات كلها موضحة في الشكل 10 ـ 2 في الفصل العاشر). ولكن لا يمكن تبليط المستوي بمخمسات منتظمة فقط. كما يمكن تبليط المستوي باستخدام شكل واحد فقط، وبطرق عديدة، كأحد المخمسين غير المنتظمين في الشكل 4 ـ 6. أما باستخدام شكلين معاً، فيمكن ذلك بطرق عديدة و لكنها أكثر تعقيداً. وقد أعطينا عن ذلك مثالين في الشكل 4 ـ 7. وتتصف هذه الأمثلة كلها حتى الآن بأنها **دورية**، بمعنى أنها تتكرر على نمط واحد بالضبط في اتجاهين مستقلين. ونعبر عن ذلك في الرياضيات بقولنا يوجد **متوازي أضلاع دوري** ـ وهو متوازي أضلاع، إذا رسمناه في وضع معين، ثم كررناه مرة بعد أخرى في الاتجاهين الموازيين لضلعيه المتجاورتين ولد نموذج التبليط المفروض . و قد أظهرنا ذلك في الشكل 4 ـ8 ، حيث رسمنا صورة تبليط دوري ببلاطات لها شكل شوكة الورد مرسومة إلى اليسار ومرتبطة بمتوازي الأضلاع الدوري الذي يتضح تبليطه الدوري في الجانب الأيمن.

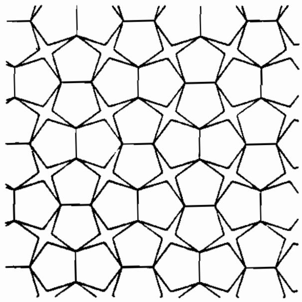
* في الحقيقة توجد خوارزمية تؤكد المساواة في حال وجودها فعلاً، ولكن لا يمكن كما يبدو إيجاد خوارزمية كالتي ارتآها المؤلف في المثال السابق يؤكد عدم التساوي، (وهذا ما يؤيده الكلام الذي ورد في بداية الفقرة.) .



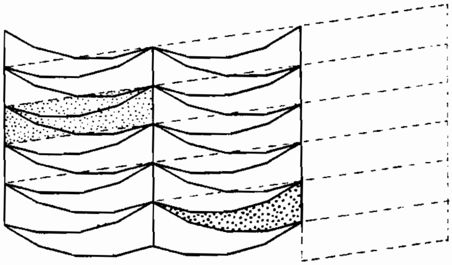


الشكل 4 ـ 6 : يمثل هذان الشكلان تبليطين دوريين للمستوى يستخدم في كل منهما شكل بلاطة واحد (اكتشفهما ماجوري رايس عام 1976) .



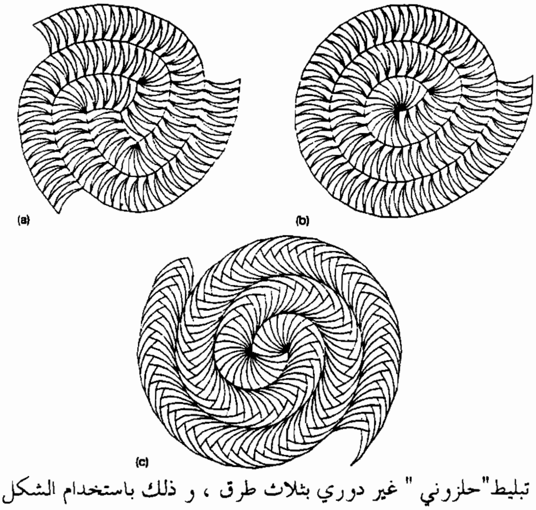


الشكل 4 ـ 7 : يوجد في هذا الشكل تبليطان دوريان للمستوي ، يستخدم في كل منهما شكلان فقط للبلاطات.

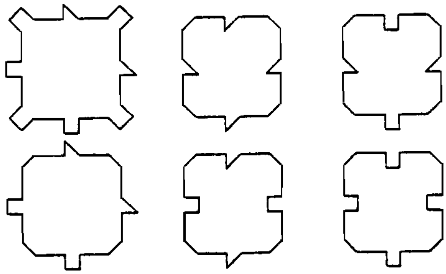


الشكل 4 ـ 8 : تبليط دوري بواسطة بلاطة لها شكل شوكة الورد وقد بينا فيه متوازي الأضلاع الدوري

وهناك العديد من طرق تبليط المستوي تبليطا غير دوري. ففي الشكل 4 ـ 9 رسمنا ثلاث طرق لتبليط المستوي تبليطاً " حلزونياً " غير دوري . وذلك باستخدام شكل البلاطة نفسه الذي له شكل شوكة الورد (المبين في الشكل 4 ـ 8) و يعرف شكل هذه البلاطة الخاص (ولأسباب واضحة) بأنه "متقلب " Versatile وكان قد ابتكره B.Grunbaum وG.C,Shepard في عام 1981 ـ 1987، وذلك اعتماداً كما يبدو على شكل سابق ينسب إلىH.Voderberg . وهكذا نلاحظ أن البلاط المتقلب يمكن استعماله في تبليط دوري و غير دوري. وتشاركه في هذه الصفة أشكال أخرى عديدة للبلاطة الواحدة. وكذلك لمجموعات من البلاطات. وهنا قد نتساءل: هل توجد بلاطات وحيدة أو مجموعات من البلاطات لا تبلط ***المستوي إلا بطريقة*** غير دورية ؟ والجواب عن ذلك "نعم". ففي الشكل 4 ـ 10 رسمت مجموعة من ست بلاطات أنشأها الرياضي الأميركي روبنسن 1971 Raphael Robinson وهي تبلط المستوي بأكمله،ولكن بطريقة غير دورية فقط.



الشكل 4 ـ 9 : تبليط"حلزوني " غير دوري بثلاث طرق ، و ذلك باستخدام الشكل " المتقلب " ذاته الذي استخدم في الشكل 4 ـ 8



الشكل 4 ـ 10 : بلاطات روبنسون الست التي تبلط المستوي بطريقة غير دورية فقط

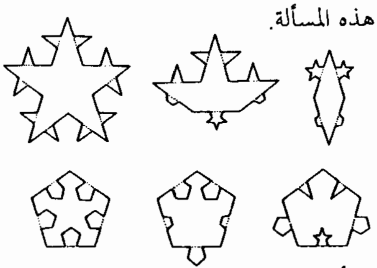
وهنا يجدر بنا أن نطل إطلالة صغيرة على تاريخ الطريقة التي اكتشفت فيها البلاطات الست غير الدورية (راجع Grunbaum وShephard 1987) ففي عام 1961 طرح المنطقي الصيني ـ الأميركي هاو وانغ Hao Wang السؤال التالي : هل يوجد نهج **نبت به** في مسألة التبليط؟ أو بمعنى آخر، هل توجد خوارزمية نقرر بواسطتها أن مجموعة منتهية، معطاة، من أشكال البلاط، يمكنها (أو لا يمكنها) أن تبلط المستوي بأكمله* ؟ لقد استطاع أن يثبت أن نهجا كهذا يبت في هذه المسألة سيكون موجودا فعلاً إذا أمكن اثبات أن كل مجموعة منتهية من البلاطات المتمايزة التي تبلط المستوي بطريقة ما لا بد أن يكون تبليطها للمستوي دورياً أيضاً. وقد كان هناك على الأرجح، كما أظن، شعور في ذلك الزمن بأنه من غير المحتمل إيجاد مجموعة تخرق هذا الشرط ـ أعني مجموعة " غير دورية " لتبليط المستوي. ومهما يكن من أمر، فقد اتبع برجر Robert Berger بعض الخطوات التي اقترحها هاو وانغ و استطاع في عام 1960 أن يثبت أنه لا وجود في الحقيقة لنهج يبت في مسألة التبليط، بمعنى أن مسالة التبليط هي أيضاً ضمن الرياضيات اللاكرورة (12).

وهكذا تؤدي النتيجة التي توصل إليها هاو وانغ إلى أنه لا بد من وجود مجموعة غير دورية من البلاطات. وقد استطاع برجر فعلا أن يعرض أول مجموعة غير دورية من البلاطات. إلا أن التعقيد الموجود في نهج برهانه جعل مجموعته تتضمن عدداً كبيراً جداً من البلاطات المختلفة ـ فكان في الأصل 20426 بلاطة. إلا أن برجر استطاع أن يقلص هذا العدد إلى 104 باللجوء إلى ما لديه من مهارات إضافية. وبعد ذلك استطاع رفائيل روبنسون عام 1971 تخفيض هذا العدد إلى ست فحسب رسمناها في الشكل 4 ـ 10.

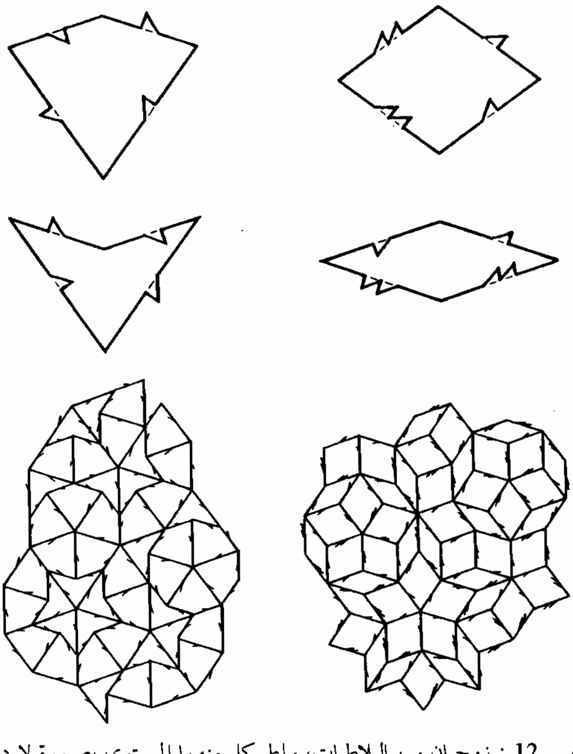
كما رسمت في الشكل 4 ـ 11 ست بلاطات أخرى غير دورية كنت قد وجدتها أنا بنفسي في عام 1973 متبعاً طريقة في التفكير تختلف كل الاختلاف عما عداها (وسأعود إلى هذه المسألة في الفصل العاشر، حيث رسمت في الشكل 10 ـ 3 مساحة مبلطة بهذه الأشكال). والحقيقة أنني بدأت التفكير في إنقاص هذا العدد ، بعد أن لفتت انتباهي مجموعة روبنسون

* إن المسألة التي درسها هاو وانغ في الواقع تختلف قليلا عن هذه ـ فالبلاطات فيها مربعة ، و لا يجوز دورانها، و أضلاعها الملونة يجب أن تتجانس عند التجاور. و لكن هذه الفروق ليست مهمة لنا هنا.

اللادورية المؤلفة من ست بلاطات. وقد استطعت بالفعل تقليصه إلى اثنين بإجراء عمليات مختلفة من مد بعض النتوءات و إعادة لصقها. وقد بينت في الشكل 4 ـــ 12 مخططين لخيارين من هذا النوع. ومن الجدير بالذكر هنا أن النماذج التي هي بالضرورة لا دورية، و التي أظهرها التبليط الكامل للمستوي، تتميز بصفات مهمة عديدة، بما في ذلك البنية شبه الدورية التي يستحيل ظاهريا تشكل بلورات منها بواساطة التناظر الخماسي الجوانب (**مضلع خماسي**). وفيما بعد سأعود ثانية إلى هذه المسألة.



الشكل 4 ـ 11 : مجموعة أخرى من ست بلاطات تبلط المستوي بصورة لا دورية فقط.



الشكل 4 ـــ 12 : زوجان من البلاطات، يبلط كل منهما المستوي بصورة لا دورية فقط (بلاطات بنروز) ، و منطقتان من المستوي كل منهما مبلطة بأحد هذين الزوجين

وربما لفت هذا المجال من الرياضيات ـ و أعني به تغطية المستوي بأشكال متطابقة ـــ انتباه القراء بكونه قسماً من الرياضيات غير الكرورة على الرغم من " تفاهته " الظاهرية، حتى لكأنه يشبه تقريبا ألعاب الأطفال. ولكن الواقع يظهر أن في هذا المجال الكثير من المسائل الصعبة و غير المحلولة . فمن غير المعروف مثلاً هل توجد (أم لا) مجموعة غير دورية مؤلفة من بلاطة وحيدة (وحيدة الشكل).

لقد عالج وانغ و برجر و روبنسون مسألة التبليط باستخدام بلاطات مكونة على أساس المربعات. أما هنا فقد أدخلت في حسابي بلاطات ذات شكل عام، ويحتاج المرء فيها إلى طريقة تكون حسوبيتها كافية لكي تظهر كل بلاطة بمفردها. ومن الطرق الممكنة للقيام بذلك هي أخذ النقاط المثلة لرؤوسها في مستوي أرغان . ويمكن عندئذ تحديد هذه النقط بدقة مناسبة بأعداد جبرية.

هل تبدو مجموعة مندلبروت أشبه برياضيات لا كرورة

لنعد الآن إلى مناقشتنا السابقة لمجموعة مندلبروت. سأفرض بقصد الإيضاح أن هذه المجموعة هي ، بمعنى معين مناسب، غير كرورة. الأمر الذي يعني أن هذه المجموعة نفسها غير عدودة تكرارياً، لأن متممتها. عدودة تكرارياً. و أعتقد أن في شكل هذه المجموعة ما يوحي بأننا سنتلقى منه على الأرجح بعض الدروس عن طبيعة المجموعات اللاكرورة و الرياضيات اللاكرورة.

لنعد إلى الشكل 3 ــ 2 الذي رأيناه سابقا في **الفصل الثالث**. ولنلاحظ أن معظم المجموعة محتشد في منطقة كبيرة لها هيئة القلب، وقد أشرت إليها في **الشكل 4 ــ 13** بالحرف A. وهي هيئة يطلق عليها اسم كارديوئيد (أي شبيه القلب **Cardioid**)، و يمكن أن نعرف المنطقة الواقعة داخلها بطريقة رياضية بأنها مجموعة النقط c الواقعة في مستوي أرغان و التي تعرف كما يلي:

$$c = z - z^2$$

حيث z عدد عقدي بعده عن المبدأ أصغر من 1/2. ومن المؤكد أن هذه المجموعة عدودة تكرارياً بالمعنى الذي افترضناه سابقاً، بمعنى أنه توجد خوارزمية تؤكد في حال تطبيقه على نقطة داخل هذه المنطقة ، بأنها موجودة فعلاً داخلها. و يمكن الحصول بسهولة على الخوارزمية الفعلية من الدستور أعلاه.

لننظر الآن في المنطقة الشبيهة بالقرص، الواقعة إلى يسار الكارديوئيد الرئيسي (المنطقة B في الشكل 4 ـ 13). إن داخل هذه المنطقة هو مجموعة النقط c المعرفة بالمعادلة:

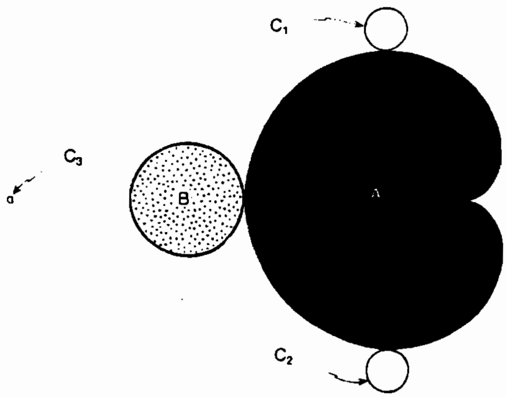
$$c = z - 1$$

حيث بعد z عن المبدأ أصغر من 1/4. إن هذه المنطقة هي فعلاً المنطقة الداخلية لقرص، لأنها مجموعة النقاط الواقعة داخل دائرة صحيحة (نصف قطرها 1/4). وهي أيضاً بالمعنى المعرف

سابقا منطقة عدودة تكرارياً. ولكن ماذا بشأن الثآليل الأخرى الموجودة على الكارديوئيد ؟ لننظر في أضخم ثؤلولين بعد القرص، إنهما تقريباً أشبه ببقعتين دائريتين تظهران تقريباً عند قمة الكارديوئيد و عند أسفله في الشكل 3 ــ 2 و قد أشرنا إليهما بالرمزين C_1 و C_2 في الشكل 4 ــ 13. ويمكن تعيينهما بدلالة المجموعة:

$$c^3 + 2c^2 + (1 - z)c + (1 - z)^2 = 0$$

حيث تتجول z على المنطقة التي بعدها عن المبدأ 1/8. والحقيقة أن هذه المعادلة لا تعطينا فحسب هاتين البقعتين (معاً) وإنما تعطينا أيضاً الشكل الصغير الشبيه بالكارديوئيد الذي يظهر إلى اليسار في الشكل 3 - 2 ــ أو المنطقة الرئيسية في الشكل 3 - 1 - و هي المنطقة المشار إليها بالرمز C_3 في الشكل 4 - 13 و هذه المناطق (كلها معاً أو كل واحدة بمفردها) تشكل مجموعات عدودة تكرارياً (بالمعنى الذي اقترحناه سابقاً) و ذلك بالنظر إلى وجود الدستور المبين أعلاه.



الشكل 4 ــ 13: يمكن أن تعرف المنطقة الداخلية من مجموعة مندلبروت بمعادلات خوارزمية بسيطة.

على الرغم من الاقتراح الذي تقدمت به بأن مجموعة مندلبروت يمكن أن تكون غير كرورة، فقد كنا قادرين حالا على تحديد وضع المساحات الكبرى في المجموعة بخوارزمية معرفة تعريفاً تاماً، وليست على درجة كبيرة من التعقيد، وهذه عملية يبدو أنها ستتكرر. كما يمكن معالجة جميع المناطق الأكثر وضوحا في المجموعة معالجة خوارزمية ــ بل حتى النسبة المئوية الساحقة من مساحتها (إن لم يكن كلها). أما إذا لم تكن المجموعة بكاملها كرورة حقيقة كما افترض، فعندئذ نستطيع أن نجزم بأن المناطق التي لا يمكن لخوارزميتنا أن تعينها، هي مناطق مرهفة جداً و يصعب العثور عليها. أضف إلى ذلك، أننا بمجرد أن نعين منطقة من هذا النوع، تزداد الفرص أمامنا عندئذ لكي نرى كيف يمكن أن نحسن خوارزميتنا بصورة يمكن معها الوصول أيضاً إلى تلك المناطق التي من هذا النوع. ومع ذلك لا بد أن توجد عندئذ (إذا كان فرضي عن اللاكرورية صحيحاً) مناطق أخرى كهذه، تختبىء بعيداً في ظلمات الرهافة

والتعقيد الأكثر عمقاً، والتي لا يمكن حتى لخوارزميتنا المحسنة أن تطالها. ولكننا نستطيع هنا أيضاً أن نحدد مواضع هذه المناطق بجهود بصيرتنا الخارقة وبراعة صنعتنا، ولكن توجد أيضاً مناطق غيرها ستظل تفلت منا و هكذا إلى ما لانهاية .

وأعتقد أن هذا الأسلوب الذي اتبعناه لا يختلف عن الأسلوب الذي تتبعه الرياضيات غالباً في المجالات التي تكون مسائلها صعبة و التي هي في الاصل غير كرورة. ويمكن غالباً معالجة أكثر المسائل شيوعاً، التي يصادفها المرء على الأكثر في مجال خاص، بإجراءات خوارزمية سهلة ــ بل قد تكون هذه الإجراءات معروفة منذ قرون. ولكن قد تكون هناك مسائل لا تنفع معها هذه الإجراءات، وعندئذ لا بد من إيجاد إجراءات أكثر تعقيداً وحذلقة لمعالجتها. وهذه المسائل بوجه خاص يمكن أن تحير الرياضيين طبعاً و تحثهم على تطوير مناهج للمعالجة أكثر قوة. فهذه المناهج لا بد أن تُبنى على أساس من البصيرة الأكثر نفاذا في أعماق طبيعة الرياضيات المستخدمة. و ربما يوجد شيء من هذا القبيل في فهمنا للعالم الفيزيائي.

لعل القارىء قد بدأ مما سبق بتكوين لمحة عن هذه الأمور ، مثل مسائل الكلمات و مسائل التبليط (على الرغم من أن هذه المجالات لم تطورها بعد عجلة الرياضيات ذلك التطوير المتقدم جداً). وقد استطعنا أن نستخدم في إحدى الحالات الخاصة برهانا بسيطاً جداً لإثبات أن كلمة (كانت معطاة) لا يمكن الحصول عليها، بالقواعد المشروعة، من كلمة أخرى (كانت معطاة أيضاً). فليس عسيراً إذن أن نتخيل أنه يمكن أن نأتي، في الحالات الأكثر وعورة ، بمناهج للتفكير أكثر حذلقة و تعقيداً لمعالجتها. فمن المرجح عندئذ أن يكون بالإمكان تطوير هذه المناهج الجديدة في التفكير لكي تصبح نهجاً خوارزمياً. وقد رأينا أنه لا وجود لنهج وحيد يمكن أن يكفي لجميع حالات مسائل الكلمات، ولكن الأمثلة التي لا تنفع معها الخوارزميات السابقة، هي تلك التي تحتاج لتركيبها إلى تأن وحذق شديدين. بالفعل فحالما نعرف كيف ركبت هذه الأمثلة ــ أي حالما نعلم علم اليقين أن هناك حالة خاصة قد أفلتت من الخوارزمية ـ نستطيع عندئذ أن نحسن خوارزميتنا، لكي تشمل أيضاً هذه الحالة الخاصة. إذ لا يمكن أن تفلت سوى ثنائيات من الكلمات عنصراها غير " متساويين "، لذلك سنعرف، حالما يصل إلى علمنا بأنها قد أفلتت، أن عنصريها (أي كلمتيها) غير " متساويين " و هذا الأمر يمكن، ببصيرتنا ، تضمينه في خوارزمية جديدة. وهكذا تؤدي بصيرتنا المحسنة إلى خوارزمية محسنة !

نظرية التعقيد Complexity Theory

إن الحجج التي قدمتها أعلاه، وفي الفصول السابقة، والمتعلقة بطبيعة الخوارزميات ووجودها و حدودها، كانت كلها في مستوي ما هو ممكن " من حيث المبدأ " . فلم أتعرض إطلاقا للسؤال : هل يرجى للخوارزميات التي نحصل عليها أن تكون بطريقة ما عملية. إذ إن تطوير خوارزمية كهذه لحل مسألة ما، حتى وإن اتضح وجودها وطريقة بنائها، قد يتطلب

عملاً شاقاً و مهارة فائقة لكي تصبح قابلة للاستعمال . و لكـن قـد يؤدي قليـل مـن البصـيرة والمهارة في بعض الأحيان إلى تقليص كبير في تعقيد الخوارزميـة، أو أحيانـاً إلى تحسـين كبـير في سرعتها. و قد بذل في السنوات الأخيرة عمل جبار في سبيل حل هذه المسائل الكثيرة التفاصيل و التقنية ، و في سياق العديد من مختلف أعمال بناء الخوارزميات و فهمها و تحسينها ـــ و هـو مجال للبحث سرعان ما انتشر و تطور. و لكن ليس مـن الملائـم بالنسبة لموضوعنـا هنـا محاولـة الدخول في مناقشة مفصلة لمثل هذه المسائل . و مع ذلـك توجـد أمـور عامـة مختلفـة أصبحـت معروفة أو مخمنة عن بعض الحدود المطلقة التي تحدد إلى أي مدى يمكن أن نزيد سرعة خوارزمية معينة. فقد تبين وجود أصناف من المسائل، حتـى بـين مـا هـو منهـا خوارزمـي بطبيعتـه ، هـي بطبيعتها الذاتية ، أصعب حلا بالطريقة الخوارمية بكثير من المسائل الأخـرى . فـلا يمكـن حـل الصعب منها إلا بخوارميات بطيئة جداً (أو ربما، بخوارزميات تتطلب فضاء تخزيـن واسـع جـداً بصورة غير طبيعية ، و غير ذلك). وتسمى النظرية التي تعنى بمثل هذه المسائل **نظرية التعقيد**.

ولا تعنى هذه النظرية كثيراً بالصعوبة التي نواجهها في حل مسائل مفـردة حـلاً خوارزميـاً، و إنما تعنى بطوائف لا نهائية من المسائل التي يمكن أن توجد لها خوارزمية عامــة تعطـي أجوبـة لجميع مسائل الطائفة الواحدة. و قد تكون مسائل الطائفة الواحــدة علـى درجـات مختلفـة مـن " الضخامة " التي تقاس في المسألة الواحدة بعدد طبيعي n (وسـيكون لنـا فيمـا يلـي حديـث أطول عن الكيفية التي يميز بها هذا العدد فعلاً ضخامة المسألة) . وليكن العدد الطبيعـي N هـو طول الزمن ـ أو الأصح ـ هو عدد المراحل الأولية التي تحتاج إليها كل مسألة خاصة مـن هـذا الصنف. فهذا العدد يتوقف بدوره على العدد n . أو دعونا نقول توخيا لزيادة قليلة في الدقة، إن من بين جميع المسائل التي هي بضخامة خاصة واحدة n ، يكون أعظـم عـدد مـن المراحـل الـتي تحتاجها الخوارمية هوN . و على هذا فكلما كبر العدد n كبر معه على الأرجح العـدد N . في الواقع إنN يكبر بسرعة أكبر من n . فقد تكون N متناسبة مثلاً مع n^2 أو مع n^3 أو ربـمـا مـع 2^n (و هذا العدد الأخير أكبر من كل من n و n^2 وn^3 وn^4 وn^5 في حالة n عـدد كبيرـــ بل هو أكبر في الحقيقة من n^r في كل حالة يكون فيها r عدداً ثابتاً ما). أو قد يكون N متناسباً تقريباً حتى مع 2^{2^n} (الذي هو أكبر من كل ما سبق من أعداد) .

ومن الواضح أن عدد المراحل قد يتوقف على نمط الحاسوب الذي شُغِّلت عليه الخوارزميـة. فإذا كان الحاسوب هو آلة تورنغ التي من النمط الذي وصفناه في الفصل الثـاني ، والـتي تعمـل على شريط واحد ـ و هي لذلك بالأحرى غير فعالة ـ فعندئذ يمكن أن يزداد العدد Nبسـرعة أكبر (أعني أن الآلة يمكن أن تجري ببطء أكثر) مما لو كانت مزودة بشريطين أو أكثر. و لكي نتجنب الوقوع في شكوك من هذا النوع نلجأ إلى تصنيف واسع يتضمن جميـع الطـرق المحتملـة التي يمكن أن تكبر فيهاN مع n باعتبارها تابعة لها ، و بصورة أنـه مهمـا كـان نمـط آلـة تورنـغ المستخدم ، نجد أن قياس درجة تزايدN يأتي دائما في الفئة نفسها . و من أمثلة هذه الفئة تلـك

التي تسمى P (التي ترمز للزمن الحدودي Polynomial time)، وهي تتضمن جميع الدرجات التي هي على الأكثر مضاعفات ثابتة* من واحدة من الكميات n، n^2 , n^3 , n^4 , n^5 أو بمعنى آخر لدينا في حال كل مسألة ترد في الفئةP (حيث أقصد هنا في الحقيقة من كلمة مسألة، طائفة من المسائل التي تحل بخوارزمية عامة واحدة):

$$N \leq K \times n^r$$

باعتبارK وr ثابتين (مستقلين عنn). وهذا يعني أن N ليست أكبر من مضاعفات n المرفوعة إلى قوة ثابتة .

ومن المسائل البسيطة التي نعرف بالتأكيد أن نمطها من الفئة P، مسألة ضرب عددين أحدهما في الآخر. ولكي نوضح ذلك يجب أن نصف أولا كيف يبرز العدد n ضخامة العددين الخاصين اللذين سنضربهما. و هنا يمكن أن نتصور أن كلاً من العددين مكتوب بالتدوين الثنائي و أن n /2 وهو العدد الدال فحسب على عدد الأرقام الثنائية في كل منهما، أي أن عدد الأرقام الثنائية في العددين معاً هوn - أي n بتة* - (و إذا كان أحد العددين أطول من الآخر،نضيف عندئذ أصفاراً إلى يسار العدد الأقصر ليصبح بطول الأطول). فمثلاً، إذا كان n =14، يمكن أن نأخذ المثال : 1011010X0011011

(وهو الجداء 1011010X11011 نفسه، ولكن أضفنا صفرين إلى يسار أقصرهما). إن أقصر طريقة مباشرة لتنفيذ هذه العملية هي أن نكتبها كما يلي:

```
        1011010
      × 0011011
      ---------
        1011010
       1011010
      0000000
     1011010
    1011010
   0000000
  0000000
  -------------
  0100101111110
```

علماً أن جدول الضرب في النظام الثنائي يتضمن: $0 \times 0 = 0, 0 \times 1 = 0$ و $1 \times 0 = 0$ و $1 \times 1 = 1$، وجدول الجمع يتضمن : $0 + 0 = 0$ ، $0 + 1 = 1$ و $1 + 0 = 1$, $1 + 1 = 10$. و قد جرت في العملية السابقة عمليات ضرب إفرادية (رقم في رقم) عددها $(n/2)\times(n/2) = n^2/4$

* تشير كلمة كثير حدود Polynomial إلى تعبير أعم من ذلك ، مثل $7n^4 - 3n^3 + 6n + 15$ و لكن هذا المثال لا يعطي عمومية أكثر. و في أي عبارة كهذه (كثير حدود) ، و عندما تكون n كبيرة جدا ، تصبح جميع الحدود التي تحوي قوى منخفضة للعددn مهملة (ففي هذا المثال المذكور، يمكننا أن نتجاهل جميع الحدود ما عدا $7n^4$.

x بتة هي واحدة قياس المعلومات و هي تعريب لكلمة bit

و يمكن أن يرتفع عدد عمليات الجمـــع الإفرادية إلى ($n/2$)-($n^2/4$)، بما في ذلـك عمليـات الحمل، فيصبح عدد العمليات الإفرادية الكلي . ($n/2$) - ($n^2/2$)كمـا يجـب أن نضمّـن هـذا العدد إضافة قليلة لأجل المراحل المنطقية المستخدمة في الحمل وهكذا يصبح الجـزء الأساسـي في عدد الخطوات الكلي هو $N= n^2/2$ (بعد إهمال حدود المرتبة الأدنى). وهذا كما هو واضـح، حدودي (13). (أي كثير حدود) .

وبوجه عام ، نقيس " ضخامة " مسألة ما، في صنف من المسائل، **بالعدد الكلي n للأرقـام الثنائية** (أو البتات). التي نحتاجها لتحديد البيانـات الحـرة[x] في المسـألة الـتي لهـا هـذه الضخامـة الخاصة. و هذا يعني أنه في حالة عدد معطى n، يوجد أكثر من 2^n مثالاً مختلفاً من المسـألة الـتي لها هذه الضخامة (لأن كل رقم يمكن أن يكون في إحدى إمكانيتين، إما 0 ، و إما 1 [†] ، ولمـا كان عدد الأرقام الكلي n ، فعدد المسـائل الممكنـة هـو 2^n) وهـذه المسـائل يجـب أن تعالجهـا الخوارزمية على نمط واحد، ليس بأكثر من N مرحلة.

ويوجد أيضاً إلى جانب فئة المسائل **P** أمثلة عديدة من (أصنـاف) المسـائل الـتي ليسـت في **P**. منها مثلاً أننا سنحتاج ، لكي نقوم بعملية حساب 2^{2^r} بعد معرفتنـا لـــ **r** ، إلى مـا يقـرب 2^{2^n}مرحلة لكي **ندون الجواب النهائي فقط**، هذا بصرف النظر عن القيـام بالحسـاب. أمـا n هنا فهي عدد الأرقام الثنائية في التدوين الثنائي للعددr . كما يتطلب حسـاب 2^{2^r} شـيئا مـن قبيل 2^{2^n} مرحلة لتدوين النتيجة فقط. فهذه المسائل أضخم مـن فئـة كثـيرات الحـدود، وهـي حتماً ليست في P.

وتوجد مسائل أهم من هذه، وهــي الـتي يمكـن أن تـدون أجوبتهـا وتمتحـن صحتهـا بزمـن حـدودي (نسـبة إلى كثـير حـدود). وتوجـد بـين المسـائل المتميزة بهـذه الخاصـة فئـة مهمـة (أو أصنـاف مـن المسـائل الـتي يمكـن حلهـا خوارمياً). وتسـمى هـذه الأصنـاف مـن المسـائل الأصنافNP . أو بتحديد أكثر، إذا كان لمسألة بعينهـا مـن أحـد أصنـاف الفئـة NP حـل مـا، عندئذ تعطينا الخوارزمية هذا الحل، ويجب أن يكون بالإمكان امتحان هذا الحـل المقـترح بزمـن حدودي للتأكد من أنه حل فعلاً. كما أن الخوارزمية تؤكد لنا عـدم وجـود الحـل في الحـالات التي لا يكون فيها للمسائل حل، ولكن المرء ليس مطالباً بأن يمتحن عدم وجـود الحـل فعـلا — سواء بزمن حدودي أم بغيره (14).

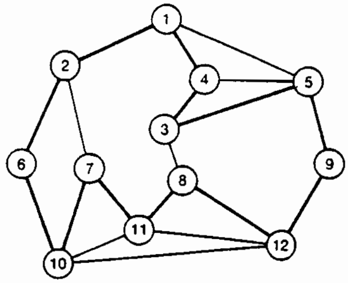
وتظهر أصناف المسائل **NP** في سياق ميادين شتى ، سواء في الرياضيات نفسها أم في الحيـاة العملية. ولكني سأكتفي بإعطـاء مثـال رياضي بسـيط هـو مسـألة إيجـاد مـا يعـرف بـــ" دارة هاملتون" في مخطط معطى. (وهذه مسـألة في غايـة البسـاطة ، برغـم هـذه التسـمية الضخمـة)

---

[x] مثال ذلك عدد الأرقام الثنائية التي احتجنا إليها في كتابة العددين المضروبين في المثال السابق .

[†] وهناك أيضاً احدى إمكانيتين للرقم الذي يليه فعدد الإمكانيات للرقمين هو 2×2 ونتابع على هذا النحو.

والمقصود من كلمة " مخطط " هو مجموعة نقاط، أو " رؤوس "، تصل بين بعض الأزواج المكونة منها خطوط تدعى " أحرف " المخطط. و لا تهمنا هنا الخواص الهندسية أو " الأبعاد"، بل سينحصر اهتمامنا في أي من الرؤوس هو الموصول بالآخر. كما لا يهمنا أن تكون الرؤوس في مستو واحد أو لا ـ بفرض أننا لا نأبه لكون الأحرف تتقاطع أحدها مع الآخر). إن الدارة الهاملتونية هي مجرد طريق مغلق أو (عروة) تتكون فحسب من أحرف المخطط، و لا تمر بكل رأس سوى مرة واحدة . و قد رسمنا في الشكل 4 ــ 14 مثالا عن مخطط ، و رسمنا فيه دارة هاملتونية و الغرض من مسألة الدارة الهاملتونية هو التحقق ، في حال مخطط معطى ، من وجود دارة هاملتونية وإظهارها أينما وجدت:



الشكل 4 ــ 14 : مخطط أظهرنا فيه دارة هاملتونية (معلمة بخطوط قائمة عريضة) و توجد دارة هاملتونية أخرى واحدة فقط يمكن للقارىء أن يأخذ على عاتقه مهمة إيجادها.

توجد طرق شتى لتمثيل مخطط بدلالة أرقام ثنائية ، و لكن لا يهم كثيرا ما هي الطريقة المتبعة . فإحدى هذه الطرق هي أن نرقم الرؤوس 1 ، 2 ، 3 ، 4 ، 5 ، 6 ، .... ثم ندرج الأزواج في لائحة مرتبة بطريقة معينة مناسبة.

(1,2),(1,3) ، (2,3) ، (1,4) ، (2,4) ، (3,4) ، (1,5) ، (2,5) ، (3,5) ، (4,5) ،..(1,6)..

و نرتب بعدئذ لائحة امتحان دقيق من الأصفار "0" والوحدان "1" فنكتب "1" في كل مكان يوجد فيه زوج يقابله حرف من أحرف المخطط و " 0 " في كل مكان يوجد فيه زوج لا يقابله حرف . فالتعاقب الثنائي:

10010110110 ......

يعني (كما يتضح من الشكل 4 ــ 14) أن الرأس 1 موصول إلى الرأس 2 و إلى الرأس 4 وإلى الرأس 5،.. وأن الرأس 4 موصول إلى الرأس 5 و إلى الرأس 3 ، ... (الشكل 4 ــ 14) . و يمكن أن تعطى الدارة الهاملتونية ، إذا شئنا ، على شكل مجموعة جزئية من هذه الأحرف التي يمكن أن توصف بأنها تعاقب ثنائي فيه أصفار أكثر بكثير من سابقه. والإجراء الامتحاني أمر يمكن القيام به بسرعة أكبر من إيجاد الدارة الهاملتونية أول الأمر . لأن كل ما يحتاج المرء ليقوم به هو أن يتحقق أن الدارة المقترحة هي دارة فعلا ، و أن أحرفها تنتمي فعلاً إلى أحرف

المخطط الأصلي و أن كل رأس من المخطط قد استخدم مرتين بالتحديد ـــ مرة في نهاية كل حرفين. إن هذا الامتحان الإجرائي يمكن القيام به بسهولة في زمن حدودي.

بل الحقيقة أن هذه المسألة ليست**NP** فحسب، بل إنها تعرف باسم **NP** ـ تامة، وهذا يعني أن أي مسألة أخرى NP يمكن أن تتحول إليها في زمن **حدودي** ـ إذن لو استطاع شخص أن يجد بذكائه خوارزمية لحل مسألة الدارة الهاملتونية في زمن حدودي، أعني لكي يثبت أن مسألة الدارة الهاملتونية هي فعلاً في **P**، لاستنتج عندئذ أن جميع المسائل**NP** هي فعلاً في **P** ! و هذه النتيجة تؤدي إلى مضامين مهمة جداً ... و بوجه عام تعد المسائل الموجودة في الصنف **P** " **مطواعة** " Tractable (أعني " يمكن حلها في مدة مقبولة ") بالنسبة لأي من الحواسيب الحديثة السريعة، في حالة n كبيرة بصورة معقولة . أما المسائل NP التي هي ليست في P فتعد "**غير مطواعة** " (أعني أنه على الرغم من كونها حلولة مبدئياً، إلا أنها " غير حلولة عملياً ") في حال n كبيرة بصورة معقولة ـ و ذلك مهما كانت زيادة سرعة الحاسوب التي نتوقعها و مهما كانت نوعيته راقية (ذلك لأن الزمن الفعلي الذي يحتاجه الحل في حال n كبيرة، سرعان ما يصبح، في حال مسألة من الصنفNP غير موجودة في P ، أطول من عمر الكون، الأمر الذي لا يفيد كثيراً في الناحية العلمية !) . إن أي خوارزمية فعالة، مهيأة لحل مسألة الدارة الهاملتونية في زمن حدودي، يمكن تحويلها إلى خوارزمية لحل **أي مسألة** أخرى **NP** (مهما تكن) في زمن حدودي !

و يمكن أن نورد مسألة أخرى من الصنف **NP** ـ تامة (15)، وهي " مسألة البائع المتجول"، التي تشبه إلى حد ما مسألة الدارة الهاملتونية ، ما عدا أن الأحرف المختلفة ترتبط هنا بأعداد، وعلى المرء أن يبحث عن الدارة الهاملتونية التي لأجلها مجموع الأعداد (و هو " المسافة " التي يقطعها البائع المتجول) **أصغرية** (أي أصغر ما يمكن). و هنا أيضا يؤدي حل مسألة البائع المتجول في زمن حدودي،إلى حل **جميع** المسائل **NP** الأخرى في زمن حدودي (بل لو وجد هذا الحل لاستحق أن يكون عنوانا رئيسيا للصحف. لأن أنظمة الشفرات السرية التي أدخلت على امتداد السنوات العدة الماضية تستند إلى مسألة تحليل الأعداد الكبيرة إلى عواملها، التي هي أيضاً مسألة **NP**. فلو وجد حل لمسألة البائع المتجول في زمن حدودي ، لأمكن على الأرجح فك رموز هذه الشفرات باستخدام حواسيب حديثة قوية . أما إذا لم تحل فستكون هذه الشفرات على ما يبدو مأمونة . أنظر**Gardner 1989**).

هناك اعتقاد شائع لدى الخبراء بأنه من **المستحيل** في الواقع حل مسألة «**NP** ـ تامة» باستخدام أي آلة من آلات "تورنغ" في زمن حدودي. وهذا يعني بالتالي أن **P** و **NP** ليسا شيئاً واحداً. وأغلب الظن أن هذا الاعتقاد صحيح، و لكن لم يبرهن عليه أحد حتى الآن . لذلك تظل هذه المسألة أهم مسائل نظرية التعقيد الباقية بلا حل.

التعقيد و الحسوبية في الأمور الفيزيائية

إن أهمية نظرية التعقيد بالنسبة للأمور التي ينظر فيها هذا الكتاب تأتي من أنهـا تفضـي إلى قضية أخرى منفصلة إلى حد ما عن مشكلة كون الأشياء خوارزمية أم لا ، ألا و هي قضيـة أن نعرف هل الأشياء التي نعلم أنها خوارزمية هي في حقيقة الأمر خوارزمية **بصـورة مفيـدة**. ومـا سأقوله في الفصول الأخيرة عن قضايا نظرية التعقيد أقل مما سأقوله عن الحسوبية. لأني أميل إلى الاعتقاد (و لو أنه بلا شك اعتقاد لم يبنَ على أساس كاف) بأن قضايا نظرية التعقيد لا تـأتي كما تأتي المسألة الأساسية للحسوبية ذاتهـا في مركـز الصـدارة مـن القضايـا المتعلقـة بـالظواهر العقلية. وإني لأشعر علاوة على ذلك بأن نظرية التعقيد في وضعها الراهن تكاد لا تمس المسـائل التي تثيرها إمكانية تطبيق الخوارزميات تطبيقا عملياً.

ومع ذلك، قد أكون مخطئا كل الخطأ بشأن دور التعقيد. فلربما كانت نظرية التعقيد بالنسبة للأمور **الفيزيائية الفعلية** مختلفة، (كما سأذكر فيما بعد الفصل التاسع ص471) مـن أوجـه لا يمكن إغفالها، عن الدور الذي ناقشناه لتونا. وقد يحتاج إظهار هذا الاختلاف إلى تسخير بعـض خواص نظرية الكم السحرية ــ فهي نظرية، علـى الرغـم مـن غموضهـا، قويـة في دقـة وصفهـا لسـلوك الـذرات و الجزيئـات و ظواهـر أخـرى عديـدة، بعضهـا علـى درجـة عاليـة جـداً مـن الأهمية. وفي الفصل السادس سـنزيل بعـض الغمـوض الـذي يحـول بيننـا و بـين هـذه النظريـة. وسنجد أنه وفقاً لمجموعة مـن الأفكـار الحديثـة الـتي أتـى بهـا ديفيـد دوتـشDavid Deutsch (1985)، يمكن **مبدئياً** إنشاء " حاسوب كمومي " توجد بالنسبة له (أصناف) من المسائل التي هي ليست في P، و مع ذلك يحلها في زمن حدودي. وحتى الآن لا يزال من غير الواضح كيف يمكن إنشاء آلة فيزيائية فعلية تعمل (بصورة موثوقة) عمل حاسـوب كمومـي ـــ هـذا عـلاوة على أن صنف هذه المسألة الخـاص الـذي كـان إلى الآن موضـع نظرنـا هـو بـلا جـدال صنـف مصطنع ــ و لكن يبدو أن الإمكانية **النظرية** لأن تكون آلة فيزيائية كمومية قادرة على التفـوق على آلة تورنغ ، هي إمكانية أصبحت مضمونة في جانبنا.

ترى أمن الجائز أن يكون دماغ الإنسان ، الـذي لا أنظـر إليـه في دراسـتي هنـا إلا " كآلـة فيزيائية " مع أنه مذهل في دقته و رهافته علاوة على تعقيده ، يسـتمد بعـض ميزاتـه مـن سـحر نظرية الكم ؟ و هــل أصبحنـا نفهـم الطـرق الـتي يمكـن بهـا لنتـائج نظريـة الكـم أن تسـتخدم استخداما مفيدا في حل المسائل أو في تكوين الأحكام ؟ و هل يعقل أنه قد يكون علينـا المضـي إلى "ماوراء" نظرية الكم الحالية لكي نستفيد من مثل هذه الميزات الممكنة ؟ و هـل مـن المحتمـل حقا أن يكون بإمكـان آلات فيزيائيـة حقيقيـة أن تتفـوق علـى نظريـة التعقيـد بالنسـبة لآلات تورنغ؟ ثم ماذا بشأن نظرية الحسوبية بالنسبة لآلات فيزيائية حقيقية ؟.

لا بد لنا لكي نعالج مثـل هـذه الأسـئلة مـن أن نتحـول مـن المسـائل الرياضيـة الصرفـة إلى التساؤل في الفصول القادمة كيف تجري الأمور بالفعل في أرض الواقع الفيزيائي

الملاحظات

1 ـ حين يكون لدينا مجموعات يمكن أن تكون عناصرها هي أيضاً مجموعات، علينا أن نكون يقظين لكي نميز بين عناصر هذه المجموعة وعناصر **عناصر** هذه المجموعة . لنفرض مثلاً أن S هي **مجموعة المجموعات الجزئية غير الخالية** لمجموعة أخرىT ، مع العلم أن عناصر T هي تفاحة واحدة، وبرتقالة واحدة، إذن T لها خاصة " الإثنينية " (أي أن عدد عناصرها إثنان) و ليس " الثلاثية " ، أما S فلها خاصة "الثلاثية" **فعلاً**. لأن عناصرها هي : المجموعة الجزئية التي عنصرها الوحيد التفاحة فقط، والمجموعة الجزئية التي تشمل البرتقالة فقط، و المجموعة الجزئية التي تشمل البرتقالة و التفاحة معاً. فالكل ثلاث مجموعات جزئية، وهذه هي العناصر **الثلاثة للمجموعة** S. بالمثل إن المجموعة التي عنصرها الوحيد هو المجموعة الخالية، هي مجموعة فيها خاصة " الواحدية " و ليس " الصفرية " ـ إذ إن لها عنصراً **وحيداً**، ونعني به المجموعة الخالية ! أما **المجموعة الخالية** نفسها ففيها طبعاً، صفر من العناصر.

2 ـ في الحقيقة ، يمكن عرض الاستدلال على نظرية غودل بطريقة لا تتعلق بمفهوم خارجي تماما " للحقيقة " في حالة دعاو من قبيل $P_k(k)$. إلا أن هذا الاستدلال يظل مرتبطاً بطريقة تأويل " المعنى " الفعلي لبعض الرموز: لا سيما أن ∃~ يعني في الحقيقة " لا يوجد (عدد طبيعي) .... بصورة أن .... ".

3 ـ ستمثل الأعداد الطبيعية فيما يلي بأحرف صغيرة، والمجموعات المنتهية من الأعداد الطبيعية بأحرف كبيرة. ولتكن $[n, k, r] \longrightarrow m$ رمزا للإفادة " إذا كانت X هي المجموعة { 0,1,... ,m } بصورة أن مجموعاتها الجزئية التي عدد عناصركل منها k ، هي حصص موزعة على r صندوقاً، عندئذ توجد مجموعة جزئية واسعة Y من X تشمل على الأقل n عنصراً بصورة أن كل المجموعات الجزئية من Y المؤلفة من k عنصراً تكون موجودة في الصندوق نفسه ". وتعني كلمة " واسعة " هنا أن Y تشمل عدداً من العناصر أكبر من أصغر عدد طبيعي بين عناصر المجموعة Y. والآن لنأخذ الدعوى : " في حال كل خيار للأعداد n، k، r يوجد عدد m_0 بصورة أن الإفادة $[n,k,r] \longrightarrow m$ تظل دائما صحيحة حين يكون m أكبر من m_0 ". لقد أثبت باريس J.Paris و هرنغتن L.Harrington (1977) أن هذه الدعوى مكافئة لنمط دعوى غودل ضمن نظام البديهيات القياسي (أي بديهيات بيانو Peano) للحساب، بمعنى أنها غير قابلة للبرهان بهذه البديهيات ، على الرغم من أنها تؤكد شيئاً بشأن هذه البديهيات هو " وضوحاً صحيح" (أعني أن هذه الدعاوي المستنتجة من البديهيات، هي نفسها في هذه الحالة، صحيحة).

4 ـ كان عنوان هـذا البحـث "أنظمـة منطقيـة قائمـة علـى الترتيبـات " (أي الأعـداد بصفتهـا الترتيبية أو الترقيمية، وليس بصفتها الأصلية التعدادية) و سيعتاد بعض القـراء علـى طريقـة تدوين أعداد كانطور الترتيبية التي كنت قد استخدمتها في الأدلاء (كقولي G_1, G_2 , G_3 فالأرقام هنا هي للترتيب : أولى ، ثانية ، ثالثة ...) . إن تراتبية الأنظمة المنطقية التي نحصل عليها بالنهج المبين أعلاه في المتن متميزة بأعداد ترتيبية حسوبة.

وتوجد بعض النظريات الرياضية التي ينص عليها بسهولة، وهي نظريات طبيعية بكل معنـى الكلمة. فإذا حاول المرء أن يبرهن عليهـا باسـتخدام قواعـد (بيـانو) المتداولـة للحسـاب، فسيتطلب ذلك منـه استخدام نهـج" محاكمـات غـودل " إلى درجـة هائلـة (لا تطـاق). (موسعاً هذا النهج إلى أبعد مما أشرت إليه بصورة هائلة). وليسـت الـبراهين الرياضيـة علـى هذه النظريات من النوع الذي يتعلق بأي استدلال غامض أو موضع تساؤل، كمـا لا يبـدو أنه خارج عن طرائق الاثبات الرياضي الطبيعي (أنظر1983 Smorynski) .

5 ـ كانت فرضية الاستمرار التي أشرنا إليها في الفصل الثـالث ص 119 (والـتي تنـص علـى أن $C = \aleph_1$) أقصى ما صادفنـاه هنـا مـن الإفـادات الرياضيـة المتطرفـة (علـى الرغـم مـن أن الرياضيين غالبـاً مـا يعـثرون علـى إفـادات أكـثر تطرفـاً مـن هـذه بكثـير) غـير أن فرضيـة الاستمرار لها أهميةإضافية، لأن غودل نفسه ومعه ب . ج. كوهن Paul J. Cohen أثبتـا أن فرضية الاستمرار هي في الواقع مستقلة عن البديهيات المتداولـة وقواعـد الإجـراء في نظريـة المجموعات. وهكذا نميز وجهة نظر الصوري من وجهة نظر الأفلاطوني بحسب موقفهما من وضع فرضية الاستمرار، فهذه الفرضية هي عند الأول " غـير بتوتـة " لأنـه لا يمكـن إثباتهـا ولا رفضها إذا استخدمنا نظام زرميلو ـ فرنكل Zermelo - Funkel الصـوري القياسـي، و" لا معنى " إذن لنعتها بأنها" صحيحة " أو " خطأ ". على أنها عند الأفلاطوني المخلص، هي فعلاً، إما صحيحة و إما خطأ. ولكن إعطاء الجواب الصحيح يتطلب شكلاً جديداً من التفكير ـ يذهب في الحقيقة إلى أبعد من استخدام نمـط دعـاوي غـودل عنـد الأخـذ بنظـام زرميلو ـ فرنكل الصوري (وقد اقترح كوهن1966) Cohen) نفسه مبدأ انعكاسياً يجعـل خطأ فرضيه الاسمترار واضحاً.

6 ـ ولمن يود وصفاً حياً وواضحاً وغير تقني لهذه الأمور، يمكنه أن يراجع (1984 Rucker).

7 ـ يبدو أن السبب الذي جعل براور نفسه يتجه نحو هذا المنحى الفكري، يعود جزئياً إلى قلقه من أن إحدى نظرياته الخاصة في التوبولوجية و هي " نظرية براور في النقطة الثابتة " ليست "بنائية" . فهذه النظرية تؤكد أنك إذا أخذت قرصاً ـــ دائـرة مثـلاً مـع داخلهـا ـ و نقلتـه بطريقة مستمرة إلى داخل المنطقة التي كان متوضعا فيها من قبل ، عندئذ توجد على الأقـل نقطة واحدة من القرص ـ تسمى نقطـة ثابتـة ـــ ينتهـي بهـا المطـاف بـالتحديد في النقطـة

التي انتقلت منها . و قد لا يكون لدينا أي فكرة عن مكان وجود هذه النقطة بالتحديد، أو هل توجد، ربما ، عدة نقاط غيرها، بل كل ما تؤكده النظرية هو وجود هذه النقطة فحسب (على الأقل) (و هذه النظرية في الواقع تعد " بنائية واضحة بحسب ما هو شائع في نظريات الوجود . ولكن ثمة نظريات وجود " غير بنائية " من رتبة أخرى غير هذه ، وهي تتعلق بما يعرف " ببديهية الاختيار " (أو تسمى " مأخوذ زورن Zorn's Lemma ") وهي بديهية ضرورية للبرهان على كثير من القضايا المعروفة، ولكنها ليست ضرورية لاتساق البديهيات). (راجع Cohen 1966 و Rucker 1984) أما في حالة براور فالصعوبة شبيهة بالحالة التالية : " إذا كانت f دالة مستمرة لمتحول حقيقي و تأخذ قيماً حقيقية موجبة وسالبة، أوجد الموضع الذي تنعدم فيه هذه الدالة ". إن الطريقة المتبعة عادة هي تشطير المجال الذي تغير فيه الدالة f إشارتها ثم تكرار هذا التشطير. و لكن الطريقة المتبعة لتقرير هل قيمة f (البينية) intermediate هي موجبة أو سالبة أو صفر، قد لا تكون " بنائية "بالمعنى المطلوب عند براور.

8 ـ يمكن أن نتخذ مخططا معجميا مناسبا ، ثم نرقم وفقه المجموعات { v,w,x,...,z } (حيث v تمثل الدالة f في هذا المعجم). ثم نتحرى (تكرارياً) في كل مرحلة هل f (w,x, ... , z)= 0 صحيحة . و عندئذ لا نحتفظ بالدعوى[f∃,w,x,....,z (w,x,....,z)=0]إلا إذا كانت صحيحة .

9 ـ أخبرتني ليونور بلوم Leonore Blum مؤخراً (مسترشدة بملاحظاتي في الطبعة السابقة لهذا الكتاب) أنها بينت أن متممة مجموعة مندلبروت ليست كرورة بالفعل كما اقترحت في النص. و ذلك بالمعنى الخاص المشار إليه في الملاحظة 10 أدناه.

10 ـ توجد نظرية جديدة في حسوبية الدوال الحقيقية التابعة للأعداد الحقيقية (تقابل نظيرتها التقليدية عن الدوال التابعة للأعداد الطبيعية، والتي تأخذ قيمها من مجموعة الأعداد الطبيعية). وقد وجدها Blum وShub و Smale في عام 1989 : و لكني لم أطلع على تفاصيلها إلا منذ وقت قريب جداً، و تطبق هذه النظرية على الدوال العقدية. لذلك يمكن أن يكون لها تأثيرات هامة في بعض القضايا المثارة في هذا المجال.

11 ـ يغلب على هذه المسألة اسم أصح هو " مسألة الكلمات المتعلقة بنصف الزمرة " . كما توجد أشكال أخرى لمسألة الكلمات التي تختلف فيها القواعد اختلافاً طفيفاً عن سابقتها و هذه الأشكال لا تعنينا هنا.

12 ـ لقد أثبت هانف(Hanf (1974 و ما يرز(Myers (1974 علاوة على ذلك أنه توجد مجموعة واحدة (مكونة من عدد كبير من البلاطات) تبلط المستوي ، إنما بطريقة غير حسوبة فحسب.

13 ـ في الحقيقة يمكن باستخدام شيء من المهارة، تخفيض هذا العدد من المراحل إلى ما يقرب من المرتبة n.log(n).loglog (n) في حالةn كبيرة ـــ التي لا تزال طبعاً فيP . ولمزيد من المعلومات عن هذه المسائل أنظر Knuth 1981.

14 ـ لكي نكون أكثر دقة ، إن الأصناف P وNP وNP ـ تامة (راجع ص 181 ـ 184) معرفة في حالة مسائل من النوع " نعم / لا " فحسب (فلو أعطينا ، مثلا ،a و b و c فهل صحيح أم لا أن a x b = c ؟) لكن الشرح المقدم في النص يكفينا.

15 ـ لو شئنا الدقة ، نحن بحاجة للشكل " نعم / لا " من هذا ، مثل : " هل توجد طريق يمكن أن يسلكهاالبائع المتجول و يكون طولها أقل من مسافة كذا أو كذا ؟ "(راجع الملاحظة السابقة).

العالم الكلاسيكي

وضع النظرية الفيزيائية

قد يتساءل المرء: ماالذي نحتاج إلى معرفته عن القوى الفاعلة في الطبيعة لكي نفكر بأن الشعور يمكن أن يكون أحدها؟ هل للقوانين المهيمنة على مكونات الجسم والدماغ أهمية ما في موضوعنا؟ لو كان عمل إدراكاتنا الواعية ينحصر في إنجاز الخوارزميات - كما يريد منا كثير من مؤيدي الذكاء الاصطناعي ان نعتقد - لما كان أمراً ذا بال أن نعرف ماهي هذه القوانين، ولكانت كل آلة *قادرة* على تشغيل خوارزمية ما، جيدة كجودة غيرها. ولكن قد يكون في مشاعرنا الواعية، من جهة أخرى، ماهو أكثر من مجرد خوارزمية، فقد تكون الطريقة التي نحن مكوَّنون فيها بالتفصيل ذات شأن ما، ومثال ذلك قوانين الفيزياء الدقيقة التي تهيمن عملياً على المادة التي نتكون منها. فقد نحتاج إلى معرفة ماهي هذه الخاصة الدفينة التي تعين ضمنياً طبيعة المادة ذاتها وترسم الطريقة كلها التي يجب أن تتصرف بها. غير ان الفيزياء لم تصل بعد إلى هذا المستوى، إذ إن هناك ألغازاً عديدة تنتظر الحل ولاتزال بحاجة إلى الكثير من التعمق. ومع ذلك يرى معظم الفيزيائيين والفيزيولوجيين أن ماعرفناه حتى *الآن* عن القوانين الفيزيائية التي تتعلق بطريقة عمل شيء عادي الحجم كالدماغ، أصبح كافياً. ففي حين أن المشكلة هي أن الدماغ، بوصفه منظومة فيزيائية، معقد وفي غاية التعقيد حتماً، وأن في بنيته وطريقة عمله كثيراً من التفاصيل التي لاتزال مجهولة، إلا أن الذين هم على استعداد للقول بأن هناك شيئاً ما هاماً نفتقر إلى فهمه في المبادئ *الفيزيائية* الكامنة خلف سلوكه، هم قلة.

وفيما بعد، سأحاول أن أدافع عن وجهة نظر غير مألوفة، وهي أننا، على العكس، لم نفهم الفيزياء بعد فهماً كافياً نستطيع أن نصف في ضوئه طريقة عمل أدمغتنا وصفاً فيزيائياً مناسباً- ولو من حيث المبدأ. غير أن طرح هذه القضية يحتاج في بادئ الأمر إلى إعطاء إلمامة شاملة عن وضع نظرية الفيزياء الراهن. لذلك يُعنى هذا الفصل بما يدعى "الفيزياء الكلاسيكية" التي تشمل ميكانيك نيوتن ونسبية أينشتين. وتعني صفة "كلاسيكي" هنا بصورة أساسية النظريات التي ظلت سائدة حتى العام 1925 تقريباً حين أتت *نظرية الكم* (وهي نظرية استُلهمت من أعمال فيزيائيين من أمثال بلانك وأينشتين وبور وهايزنبرغ وشرودنغر ودوبروي وبورن وجوردان وباولي وديراك) وهذه النظرية هي نظرية الارتياب واللاحتمية والغموض في وصف سلوك الجزيئات والذرات ، الجسيمات مادون الذرية، في حين أن النظرية الكلاسيكية كانت *حتمية*،

يتعين المستقبل فيها دائماً بالماضي كل التعيين. حتى لقد تكوَّن لدينا عبر العصور فهم للفيزياء أدى بنا إلى صورة للعالم دقتها غير عادية بكل معنى الكلمة، مع أن أشياء كثيرة غامضة كانت تحوم حول هذا الفهم، أو حول هذه الفيزياء الكلاسيكية. لذلك سيتوجب علينا دراسة نظرية الكم (في الفصل السادس)، لاسيما أني أخالف مايبدو الآن أنه وجهة النظر السائدة بين الفيزيولوجيين. فأنا أعتقد أن الظواهر الكمومية لها على الأرجح أهميتها في عمليات الدماغ - غير أن توضيح هذا الأمر هو موضوع الفصول التالية.

إن ماأنجزه العلم حتى الآن كان رائعاً. ويكفي لإثبات ذلك، أن ننظر حولنا لنشاهد ماأمدتنا به قوة فهمنا الخارقة للطبيعة من تقنيات هذا العصر، فقد كانت إلى حد بعيد مستمدة من غنى التجربة الحسية الهائل. على أن الدعامة الخلفية التي تستند إليها تكنولوجيتنا أكثر مما تستند إلى التجربة الحسية بكثير هي الفيزياء *النظرية*. فقد بلغت نظرياتها المشروعة عندنا الآن حداً من الدقة يلفت النظر، وهي الفيزياء التي سنُعْنى بها هنا. علماً أن قوتها لاتكمن في هذه الدقة بالتحديد، بل إنها ترجع أيضاً إلى حقيقة ماكتشف من أنه يمكن جداً معالجتها معالجة رياضية محكمة ومفصلة، وهكذا منحتنا هذه الوقائع كلها معاً علماً لاريب أن قوته تثير الإعجاب.

غير أن في هذه النظرية الفيزيائية جزءاً كبيراً لايمكن وصفه بالحداثة، وإذا كان ثمة حدث بارز في هذا الجزء يسمو على كل ماعداه، فهو نشر كتاب اسحق نيوتن "برنكيبيا" "Principia" (المبادئ) عام 1687. فقد برهن هذا الأثر الخالد كيف يمكن أن ندرك إلى حد بعيد، بدءاً من عدد صغير من المبادئ الفيزيائية الأساسية، كيف سيكون سلوك الأشياء الفيزيائية فعلاً، وبدقة مذهلة في أكثر الأحيان (وقد عُني هذا الكتاب أيضاً بتطوير كثير من التقنيات الرياضية التي وضع لها أويلر **Euler** وآخرون فيما بعد طرقاً عملية أكثر). على أن نيوتن مدين جداً بعمله، كما أقر آنذاك، إلى إنجازات مفكرين بارزين سابقين، نذكر منهم غاليليو غاليليه ورنيه ديكارت وجوهانس كبلر. كما تخللت عمله مفاهيم مهمة ترجع أيضاً إلى مفكرين أقدم من ذلك، كالأفكار الهندسية عند أفلاطون، وأودوكسوس، وإقليدس، وأرخميدس، وابولونيوس الذين سأتحدث عنهم أكثر فيما بعد.

وقد ظهرت بعد ذلك انتقالات معينة عن مشروع ديناميك نيوتن الأساسي. فكانت هناك في البدء النظرية الكهرطيسية التي طورها جيمس كليرك مكسويل **J.M.Maxwell** في أواسط القرن التاسع عشر والتي شملت علاوة على سلوك الحقلين الكهربائي والمغنطيسي الكلاسيكيين، سلوك الضوء أيضاً (1). وستكون هذه النظرية الرائعة موضع اهتمامنا بعد قليل في هذا الفصل. وهي تتمتع اليوم بأهمية بالغة في التكنولوجية. ولاجدال في أن الظواهر الكهرطيسية لها صلة بأعمال دماغنا. على أن ماهو أقل وضوحاً، هو احتمال وجود أهمية ما للنظريتين النسبويتين العظيمتين (اللتين ارتبطتا باسم أينشتين) في عمليات التفكير. وكانت نظرية النسبية *الخاصة* قد

تطورت من دراسة معادلات مكسويل. فقد طرحها هنري بوانكاريه Henri Poincaré ولورنتز Hendrick Antoon Lorentz وأينشتين (ثم منكوفسكي Hermann Mincowski الذي قدم وصفاً هندسياً رائعاً لها) لكي يفسروا سلوك الأجسام المحيّر عندما تتحرك بسرعة قريبة من سرعة الضوء. وكانت معادلة أينشتين الشهيرة "$E = mc^2$" إحدى نتائج هذه النظرية. ولكن هذه النظرية ليس لها إلى الآن سوى أثر طفيف في التكنولوجية (ماعدا ماله صلة بمجال الفيزياء النووية). كما يبدو أن صلتها بأعمال دماغنا، هي على الأغلب، جانبية. ولكن النسبية الخاصة تطلعنا، من وجهة أخرى، على حقيقة عميقة عن الواقع الفيزيائي تتعلق بطبيعة *الزمن*، كما ستؤدي بنا، كما سنرى في الفصول القادمة، إلى قضايا محيّرة عميقة تتصل بنظرية الكم التي قد تكون لها أهميتها فيما يتصل بإدراكنا "لجريان الزمن". أضف إلى ذلك أنه لابد لنا من فهم هذه النسبية الخاصة قبل أن نتمكن من تقويم نظرية أينشتين النسبية *العامة* تقويماً مناسباً (أي نظرية أينشتين التي تستخدم انحناء الزمكان لوصف الثقالة). وهذه النظرية الأخيرة يكاد ألا يكون لها أثر* في التكنولوجية. لذلك قد يكون من أعجب الأمور أن توحي بوجود صلة مابينها وبين عمل الدماغ. إلا أن ماسيكون له أكبر صلة بمداولاتنا القادمة، هو هذه النسبية *العامة*، ولاسيما في الفصلين السابع والثامن، إذ سننطلق فيهما إلى أبعد مايبلغه الزمان والمكان لكي نعثر هناك على شيء من التغيرات التي أنادي بأنه لابد منها لكي يصبح بالإمكان تكوين صورة واضحة عن نظرية الكم (وسنتحدث عن ذلك فيما بعد حديثاً أطول).

تلك هي المجالات الهامة الكبرى في الفيزياء *الكلاسيكية*. فماذا عن الفيزياء الكمومية؟ إنها ـ بخلاف النظرية النسبية – قد بدأت فعلاً باتخاذ طريقها إلى التكنولوجية. وهذا يرجع، إلى حد ما، إلى الضوء الذي سلطته لنا على بعض المجالات الهامة تكنولوجياً كالكيمياء والتعدين. حتى ليمكن القول: لقد أصبحت هذه المجالات بعض فصول الفيزياء. وهذا نتيجة لما قدمته لنا نظرية الكم من رؤى جديدة واضحة التفاصيل. عدا عن أنها أطلعتنا على ظواهر جديدة كل الجدة، بما في ذلك الليزر الذي ربما كان أكثرها شيوعاً. لذلك، ألا يمكن أن تقوم بعض جوانب نظرية الكم أيضاً بدور حاسم في الفيزياء المتعلقة بأساس عملياتنا الذهنيّة؟

ثم ماذا نقول عن تصوراتنا الفيزيائية الحديثة المنشأ؟ فقد يصادف فيها بعض القراء أفكاراً عبر عنها أصحابها بطريقة مثيرة بالغة الحماس، كتلك التي تتضمن بعض الأسماء مثل "كواركات" (ص 196 في هذا الفصل) و"نظريات التوحيد الكبير" (ن ت ك) Grand Unified Theories (G U T) و"السيناريو التضخمي" "inflationary scenarion"

---

* قلنا "يكاد ألا" وليس "لايوجد أبداً"، لأن الدقة المتطلبة في سلوك المسابر الفضائية تتطلب حالياً أن تحسب مداراتها مع أخذ النسبية العامة بعين الاعتبار – وتوجد أدوات قادرة على تحديد وضع الشخص على الأرض بمثل هذه الدقة (حتى في حدود أقدام قليلة – في الحقيقة) وهذا يتطلب أن تؤخذ تأثيرات انحناء الزمكان بالحسبان.

(راجع الملاحظة (12) في ختام الفصل السابع) و "التناظر الفائق" supersymmtery و "نظرية الأوتار (الفائقة)" "(super) string theory " إلخ. فياترى، كيف نوازن مشاريع الأفكار الجديدة هذه مع تلك التي ذكرتها منذ قليل؟ هل نحن بحاجة إلى بعض المعرفة عنها أيضاً؟ إني أومن بأنه: لكي أضع الأمور في نصابها المناسب، عليَّ أن أصنف النظريات الفيزيائية الأساسية في ثلاث فئات كبرى. وسأطلق على هذه الفئات الأسماء التالية:

1. الفخمة

2. المفيدة

3. التلمسية

أما ***الفخمة*** فهي التي يجب أن نصنف فيها جميع النظريات التي كنت أناقشها في الفقرات السابقة، مع الانتباه إلى أن قولي عن نظرية بأنها **فخمة** لايعني أنه من الضروري أن تكون قابلة للتطبيق على ظواهر العالم من دون تفنيد. ولكني أطلب - بالمقابل - أن تكون سعة المجال الذي تطبق فيه والدقة التي تطبق بها، هما، بمعنى ما ***متميزتين***. لذلك **يُعَدُّ** وجود أي نظرية في هذه الفئة، بعد الطريقة التي عرفتها بها، أمراً بالغ الأهمية إلى أبعد الحدود، فأنا لم يصل إلى علمي وجود أي نظرية أساسية في أي علم آخر غير الفيزياء يمكن أن ندخلها، بكل معنى الكلمة، في هذه الفئة. وربما كانت نظرية الاصطفاء الطبيعي كما طرحها داروين Darwin و والاس Wallace قد قاربتها، ولكنها لاتزال على مبعدة لايستهان بها منها.

إن الهندسة الاقليدية التي درسنا طرفاً منها في المدرسة، هي أقدم النظريات ***الفخمة*** وإن كان من الجائز ألا يكون القدماء قد نظروا إليها بأنها نظرية فيزيائية على الاطلاق، لكنها كذلك بالفعل، فهي نظرية فخمة ورائعة الدقة، تبحث في المكان الفيزيائي وفي هندسة الأجسام الصلبة. ولكن لماذا أشير إلى الهندسة الإقليدية بأنها نظرية ***فيزيائية*** وليست فرعاً من فروع الرياضيات؟ ولعل مايثير الاستغراب أن من أبرز الأسباب الداعية إلى ذلك هو أننا نعرف حالياً أن الهندسة الإقليدية ***ليست دقيقة كل الدقة*** في وصف المكان الفيزيائي. فنحن نعرف الآن من نسبية أينشتين العامة أن المكان (-الزمان) في حقيقة الأمر "منحن" عند وجود حقل ثقالي (أي أنه **ليس** إقليدياً بكل معنى الكلمة). ولكن هذا الواقع لاينتقص من وصفنا للهندسة الإقليدية بأنها نظرية ***فخمة***، لأن الانحرافات عن التسطح الإقليدي على مدى المتر، طفيفة جداً، والخطأ الناجم عن اتخاذنا للهندسة الإقليدية هندسة للفضاء، هو أقل من قطر ذرة الهدروجين!

كما يبدو معقولاً أن نقول عن نظرية السكون (أو التوازن) (التي تتحدث عن الأجسام التي ليست في حالة حركة)، كما طورها أرخميدس وبابوس Pappus وستيفن Stevin، إنه من الممكن أن توصف أيضاً بأنها ***فخمة***، وهي اليوم مدرجة في ميكانيك نيوتن. ولابد قطعاً من أن تصنف الأفكار العميقة الواردة في الديناميك (أي الأجسام في حالة الحركة) - التي أدخلها غاليليه حول العام 1600 وطورها نيوتن إلى نظرية رائعة شاملة - في عداد النظريات ***الفخمة***.

إذ إن الدقة الملاحظة عند تطبيق هذه النظرية على حركة الكواكب وأقمارها هي دقة متميزة جداً– إنها أفضل من جزء في العشرة ملايين. وتطبق أفكار نيوتن هذه نفسها هنا على الأرض – كما تطبق بعيداً بين النجوم والمجرات – بدقة نسبية متقاربة. كما تسري نظرية مكسويل أيضاً بدقة مماثلة على مجال رحب يفوق الوصف، يمتد من ضآلة الذرات والجسيمات دون الذرية حتى المجرات التي هي أكبر من تلك بمليون مليون مليون مليون مليون مليون (أي 10^{36}) مرة! (أما عند نهاية سلم الأبعاد الصغيرة جداً، فيجب أن يتم التوفيق بطريقة مناسبة بين معادلات مكسويل وقواعد ميكانيك الكم). ولذلك كان لابد أيضاً بالتأكيد من وصف نظرية مكسويل بأنها ***فخمة***.

وكذلك توفر نسبية أينشتين الخاصة (التي مهد لها بوانكاريه، ثم صاغها منكوفسكي صياغة أنيقة) وصفاً رائع الدقة للظواهر التي يتاح فيها للأجسام بأن تسير بسرعة تداني سرعة الضوء، لأن وصف نيوتن يتلجلج أخيراً عند هذه السرعات. ولقد عممت نظرية أينشتين العامة الأصيلة الرائعة الجمال، نظرية نيوتن الديناميكية (في الثقالة) وأدخلت تحسيناً على دقتها في حساب حركات القمر والكواكب. أضف إلى ذلك أنها فسرت تفاصيل الوقائع الرصدية التي لم تنسجم مع مخطط نيوتن القديم. ولقد بينت إحدى هذه الوقائع (وهي "النباض المثنوي" binary pulsar أنظر ص 258) أن نظرية أينشتين دقيقة حتى درجة جزء من 10^{14} فلابد إذن من أن نصف نظريتي أينشتين معاً – والثانية شملت الأولى – بين النظريات ***الفخمة*** (وهذا لدواعي أناقتها الرياضية، ثم لدواع بمثل وجاهة الأولى تقريباً، وهي دقتها).

ولاشك أن مجال الظواهر التي تفسر بحسب نظرية ميكانيك الكم الثورية، ذات الجمال الفريد ودقة الاتفاق مع التجربة، يستدعي منا، صراحة، ضرورة وصف هذه النظرية أيضاً بأنها ***فخمة***. إذ لانعرف أنها تعارضت مع أي تجربة، حتى أن قوتها تتجاوز حدود ذلك بكثير بالنسبة إلى عدد الظواهر التي لم يكن يوجد لها تفسير حتى الآن، والتي تفسرها اليوم هذه النظرية: فهي تفسر قوانين الكيمياء، واستقرار الذرات، وحدّة خطوط الطيف (انظر ص279) وترتيبها المميز بالنسبة لكل مادة على حدة، والظاهرة الغريبة، الناقلية الفائقة (أي المعدومة المقاومة الكهربائية)، وسلوك الليزر. وهذا كله ليس سوى قليل من كثير غيره.

لقد وضعنا النظريات ***الفخمة*** إذن في مكانة سامية، ولكن أليس هذا ماصرنا نألفه في الفيزياء. ثم ماذا عن النظريات الأحدث؟ إني أرى أن ليس بينها سوى واحدة يمكن أن نطلق عليها صفة فخمة، وهي ليست حديثة كل الحداثة, إنها النظرية التي تدعى الإلكتروديناميك الكمومي quantum electrodynamics (أي التحريك الكهربائي الكمومي)، التي انبثقت من أعمال جوردان Jordan وهايزنبرغ Heisenberg وباولي Pauli، ثم صاغها ديراك Dirac في الفترة بين 1926 و 1934. وبين عامي 1947 و 1948 جعلها بيت Bethe وفاينمان Feynman وشفينغر Schwinger وتوموناغا Tomonaga صالحة للاستعمال. وهي نظرية تبدو مزيجاً من

مبادئ ميكانيك الكم مع النسبية الخاصة. وتحتوي على معادلات مكسويل مع معادلة أساسية تحدد حركة الإلكترونات وسبينها، ويعود الفضل فيها لديراك. ولكن النظرية بمجموعها ليس لها تلك الأناقة الآسرة، أو الاتساق الذي نراه في النظريات ***الفخمة*** السابقة لها. ولكنها يجب أن تصنف معها بفضل دقتها الاستثنائية الحقيقية. وإحدى نتائجها الجديرة بالملاحظة بوجه خاص أنها تعطي قيمة العزم المغنطيسي للإلكترون (إذ تتصرف الإلكترونات تصرف مغانط دقيقة ناتجة عن دوران شحناتها الكهربائية. ويشير التعبير "عزم مغنطيس" إلى قوة هذا المغنطيسي). ولقد حُسبت قيمة هذا العزم من نظرية الإلكترودیناميك الكمومي، فكانت بالواحدات المناسبة – مع تسامح بخطأ يقرب من 20 في الرقمين الأخيرين: 1,001 159 65246 في حين أن أحدث قيمة تجريبية هي 193 652 159 1,001 (مع خطأ محتمل يقرب من 10 في الرقمين الأخيرين). وهذه دقة يمكن أن تعين، كما لاحظ فاينمان، المسافة بين نيويورك ولوس أنجلوس بخطأ لايتجاوز سماكة شعرة الإنسان. ونحن هنا لسنا بحاجة إلى أي معرفة عن هذه النظرية ولكني سأذكر باختصار، واستكمالاً للبحث لاغير، بعض سماتها الأساسية قرب نهاية الفصل القادم* .

وتوجد بين النظريات الشائعة التي أضعها في فئة ***المفيدة***، نظريتان لانحتاج إليهما هنا، ولكنهما تستحقان الذكر. أولاهما وهي نموذج ***كواركات*** جل – مان – زفايغ Gell - Mann - Zweig - للجسيمات دون الذرية التي تدعى هادرونات (كالبروتون والنترون والميزون إلخ، التي تتألف منها نوى الذرات، أو بالأحرى الجسيمات التي تتبادل "التأثير القوي") إضافة إلى النظرية المفصلة (والأحدث) التي تتحدث عن هذا التأثير المتبادل، وتدعى الكروموديناميك الكمومي quantum chromodynamics أو التحريك اللوني الكمومي. والفكرة الأساسية هنا هي أن جميع الهادرونات تتألف من مكونات تسمى "كواركات"، وأن هذه الكواركات تتبادل التأثير فيما بينها بنوع من التعميم لنظرية مكسويل (يسمى نظرية يانغ – ميلز Yang - Mills). أما النظرية الثانية، فيرجع الفضل فيها إلى غلاشو Glashow وعبد السلام Salam ووارد Ward واينبرغ Weinberg وتستخدم أيضاً نظرية يانغ -ميلز. وهي توحد القوى الكهرطيسية مع التأثيرات المتبادلة "الضعيفة" المسؤولة عن ظاهرة التفكك المشع. كما تتضمن وصفاً للجسيمات المسماة ***لبتونات*** (الإلكترونات والميونات والنترينوهات، وكذلك الجسيمات W و Z أي الجسيمات التي تتبادل "التأثير الضعيف"). وهاتان النظريتان (الأولى والثانية) تدعمهما بعض التجارب دعماً حسناً. إلاّ أن فيهما، ولأسباب مختلفة، شيئاً من عدم اللياقة أكثر مما نود (وهذا هو حال نظرية الإلكترودیناميك الكمومي أيضاً وإن يكن بدرجة أقل) كما أن دقتهما

---

* أنظر كتاب فاينمان (1985) النظرية الغريبة حول الضوء والمادة the strange theory of light and matter وهو تبسيط لنظرية الإلكترودیناميك الكمومي على مستوٍ جماهيري.

وقدرتهما على التنبؤ تأتيان في موضع قاصر عن بلوغ المستوي "الاستثنائي" المطلوب لتصنيفهما في فئة ***الفخمة***. وفي بعض الأحيان يطلق على هاتين النظريتين معاً (بما في ذلك الإلكترودیناميك الكمومي المتضمن في الثانية) اسم النموذج القياسي **Standard model**.

وهناك أخيراً نظرية من نمط آخر أعتقد أيضاً أنها تنتمي إلى فئة ***المفيدة*** على الأقل. وهي تلك التي تدعى نظرية ***الإنفجار الأعظم*** **big bang** عن أصل الكون* ، والتي ستقوم بدور مهم في مناقشات الفصلين السابع والثامن.

ولاأظن أن أي شيء آخر فوق ماذكر يأتي في فئة ***المفيدة***(2). ولكن تشيع الآن (أو حديثاً) أفكار عديدة، يسمى بعضها نظريات كالوزا -كلاين Kaluza-Klein، كنظريتي "التناظر الفائق" (أو "الثقالة الفائقة") ولاتزال هناك نظريات "الأوتار" (أو "الأوتار الفائقة") البالغة التألق والرواج، وكذلك نظريات التوحيد الكبير (إضافة إلى الأفكار المستمدة من هذه النظريات، مثل "السيناريو التضخمي". أنظر الملاحظة 13 في الفصل السابع). ففي رأيي أن هذه النظريات كلها تقع في فئة ***التلمسية*** (أنظر Barrow 1988 و Close 1983 و Davies، وBrown 1988 و Squires 1985). والفارق بين فئتي ***المفيدة والتلمسية*** هو افتقار الأخيرة إلى أي سند تجريبي له أهميته (3). ولكن هذا لايعني أنه لايمكن لإحدى نظريات ***التلمسية*** أن تتاح لها فرصة الارتفاع بعد حدث رائع إلى فئة ***المفيدة***. أو حتى إلى فئة الفخمة. فبعضها لايخلو في الحقيقة من أفكار أصيلة تحمل وعوداً وجيهة، ولكنها تظل مجرد أفكار كما هي الآن طالما أنها من غير سند تجريبي. ومجال الفئة ***التلمسية*** واسع جداً. فقد تضم بعض نظرياتها أفكاراً تحوي بحثاً عن خطوة جديدة ملموسة في تفسير الوقائع أو فهمها، في حين أن بعضها الآخر يصدمني لما فيه من ضلال أو "اختراع" مؤكد. (ولقد راودتني فكرة فصل فئة رابعة عن الفئة ***التلمسية*** وتسميتها فئة **الضالة** – ولكني عدلت عن ذلك، لأني لاأريد أن أفقد نصف أصدقائي!).

يجب ألاّ يدهش المرء من أن النظريات ***الفخمة*** الرئيسية هي نظريات قديمة، فقد مر عبر التاريخ حتماً نظريات كثيرة جداً صنفت في فئة ***التلمسية***، ثم طوى النسيان معظمها. كما لابد أن نظريات عديدة قد ذوت بعد أن كانت في فئة ***المفيدة***. ولكن يوجد أيضاً بعض منها انضوى بالمقابل في نظريات أتت بعدها صنفت في فئة ***الفخمة***. ولنأت على ذلك بقليل من الأمثلة. ففي القديم وضع اليونانيون نظرية معقدة إلى أبعد حد عرفت ***بالنظام البيطليموسي***، ولكن كوبرنيكوس وكبلر ونيوتن وضعوا فيما بعد [بالتتالي] نظاماً أفضل منه بكثير. إذ إن حركات الكواكب كانت، بحسب المشروع الأول، تتم وفق تركيب معقد من الحركات

---

* إن النظرية التي أشير إليها هنا هي "النموذج القياسي" للانفجار الأعظم، لأن هناك أشكالاً عديدة من هذه النظرية، تدعى كلها الانفجار الأعظم، والأكثر شيوعاً بينها الآن، هي التي تعرف باسم "السيناريو التضخمي" – وهي في رأيي في فئة **التلمسية** قطعاً.

الدائرية، وكان ذلك مشروعاً مفيداً بكل معنى الكلمة للقيام بالتنبؤات، إلا أنه معقد جداً، ويزداد تعقيده كلما تطلبنا منه دقة أكبر. لذلك يبدو لنا اليوم هذا النظام مصطنعاً جداً، ولكنه مثال جيد للنظرية ***المفيدة*** التي استمرت في الحقيقة مايقرب من عشرين قرناً، ثم زالت كنظرية فيزيائية، على الرغم من أنها قامت بدور تنظيمي ذات أهمية تاريخية واضحة. أمّا إذا أردنا مثالاً جيداً عن نظرية ***مفيدة*** من النوع الناجح جداً، فيمكننا أن نلتفت بدلاً من ذلك إلى تصور كبلر المتألق لحركة الكواكب الاهليلجية. أو إلى مثال آخر كجدول مندلييف Mendeleev الدوري للعناصر الكيماوية. إلا أن هذين المثالين ليسا مشروعين تنبؤيين بالدرجة "الاستثنائية" المطلوبة، ولكنهما أصبحا بعد ذلك نتيجتين "صحيحتين" ضمن نظريتين ***فخمتين*** كانتا في أصلهما (وهما على التوالي: ميكانيك نيوتن ونظرية الكم).

ولن يكون لدي الكثير لأقوله في المقاطع والفصول القادمة عن النظريات الشائعة التي لاتتعدى **المفيدة والتلمسية**، ولكن لدي مايكفي لأقوله عن النظريات ***الفخمة***. ولدينا لحسن الحظ مثل هذه النظريات، فنستطيع إذن أن نفهم العالم الذي نعيش فيه بطريقة رائعة الكمال. ولكن علينا أن نحاول في النهاية أن نقرر: هل بلغت هذه النظريات من الغنى مايكفي لأن يكون أداء أدمغتنا وعقولنا يتم وفق أحكامها؟ هذا موضوع سأتطرق إليه في سياقه الضروري. أمّا الآن فدعونا نلقي نظرة على النظريات ***الفخمة*** كما نعرفها ونحاول أن نتقصى صلتها مع مانسعى إليه في هذا الكتاب.

الهندسة الإقليدية

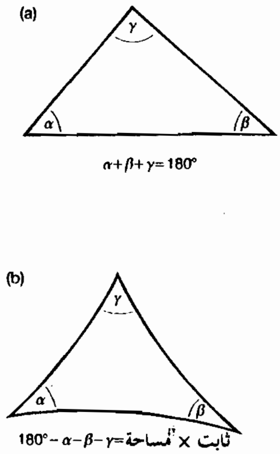
ليست الهندسة الاقليدية في الواقع سوى الموضوع الذي تعلمنا في المدرسة أنه هو "الهندسة". وفي ظني مع ذلك أن معظم الناس يعتقدون أنها من الرياضيات وليست نظرية في الفيزياء. وهي، بلاشك، رياضيات أيضاً، ولكنها بأية حال ليست أبداً الهندسة الرياضية الوحيدة التي يمكن تصورها. فالهندسة الخاصة التي ورثناها عن إقليدس، تصف مكان العالم الفيزيائي الذي نعيش فيه وصفاً دقيقاً جداً، ولكن هذه الهندسة ليست ضرورة منطقية [بمعنى أنها ليست نتيجة محتمة لمعطيات المنطق الصوري] وإنما هي مجرد هيئة (قريبة من الصحة) للعالم الفيزيائي ***نشاهده*** فيها.

وقد قلنا ذلك، لأن هناك في الواقع هندسة أخرى تدعى الهندسة اللوباتشفسكية (أو الزائدية)*. وهي تشبه الهندسة الإقليدية كثيراً في معظم النواحي ولكن مع بعض الفروق الطريفة: من ذلك مثلاً أن مجموع زوايا أي مثلث في الهندسة ***الإقليدية*** هو دائماً 180° كما

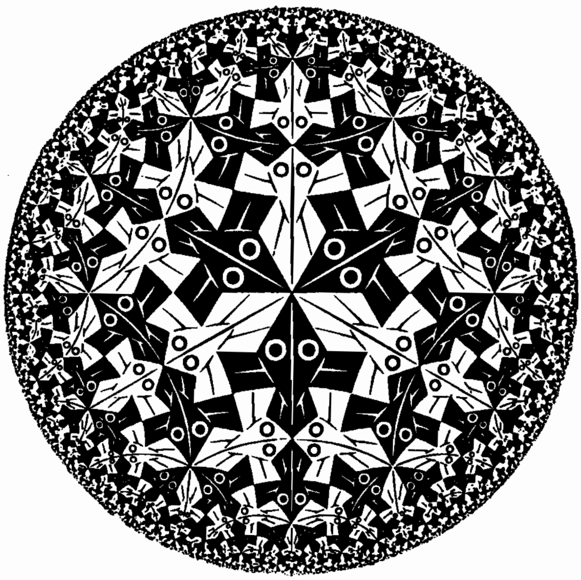
---

* كان لوباتشفسكي N.I.Lobachevski (1792-1856) واحداً من عدد من العلماء الذين اكتشف كل منهم بمعزل عن الآخر بأن هذا النوع من الهندسة هو بديل لهندسة إقليدس. أما الآخرون فهم Carl Friedrich Gauss (1777-1855) و Ferdinand Schweickard و Janos Bolyai.

نذكر. أما في الهندسة اللوباتشفسكية فهذا المجموع أقل دائماً من 180°.والفرق متناسب دوماً مع مساحة المثلث (أنظر الشكل 5-1).



الشكل 5-1: (a) مثلث في الفضاء الإقليدي (b) مثلث في الفضاء اللوباتشفسكي



الشكل 5-2 : رسم تصوره إشر Escher لفضاء لوباتشفسكي (تعد جميع السمكات السوداء قابلة للإنطباق بحركة انتقال في المستوي اللوباتشفسكي، وكذلك السمكات البيضاء).

ولقد رسم الفنان الألماني المتميز إيشر Maurits C.Escher بعض الرسوم الدقيقة جداً، والجميلة، التي تمثل هذه الهندسة. فنسخنا نحن هنا أحد رسومه المطبوعة في الشكل 5-2 الذي يجب أن نعتبر فيه تمشياً مع هندسة لوباتشفسكي أن كل سمكة سوداء لها حجم كل سمكة سوداء أخرى وشكلها نفسه، وأن هذا الأمر نفسه يسري أيضاً على السمكات البيضاء. وهكذا يتضح للقارئ أنه لايمكن تمثيل هندسة لوباتشفسكي بدقة تامة في المستوي الإقليدي العادي، الأمر الذي أدى إلى اكتظاظ السمكات الظاهري داخل المحيط الدائري فحسب. ولكي تتضح الفكرة أكثر في هذا النموذج يمكن للقارئ أن يتخيل نفسه أنه وضع داخل النموذج وفي مكان ما قريب من محيطه. فمن المفروض عندئذٍ أن تبدو له هندسة لوباتشفسكي هي نفسها كما لو كان في وسط النموذج أو في أي موضع آخر منه، والشيء الذي يبدو أنه على محيط هذا النموذج، وفقاً للتمثيل الإقليدي المبين أعلاه، هو، في الحقيقة، اللانهاية في هندسة لوباتشفسكي. فيجب ألا يعد المحيط الدائري الراهن على الاطلاق جزءاً من فضاء لوباتشفسكي ولاحتى أي جزء من المنطقة الواقعة ***خارج*** الدائرة (إن بوانكاريه هو صاحب الفضل في تمثيل المستوي اللوباتشفسكي بهذه الصورة العبقرية التي تتميز بأن الأشكال الصغيرة فيها لاتتشوه بالتمثيل - ومايتميز فحسب هو قياسها) و "الخطوط المستقيمة" في هندسة لوباتشفسكي (التي رسم إيشر سمكاته على طولها) هي دوائر تقطع محيط هذه اندائرة الحدودية بزوايا قائمة.

ومن المرجح جداً أن تكون هندسة لوباتشفسكي ***هي فعلاً*** الهندسة الصحيحة في عالمنا على الصعيد الكوني (أنظر الفصل السابع ص 384)، إلا أن ثابت التناسب بين نقصان زوايا المثلث [عن 180°] ومساحته لابد أن يكون ***بالغ الصغر*** في هذه الحالة، مما يجعل هندسة إقليدس هندسة تقريبية ممتازة جداً لهذه الهندسة على أي صعيد عادي. ولكن نظرية أينشتين النسبية العامة - كما سنرى فيما بعد في هذا الفصل - تقول إن هندسة عالمنا ***محروفة في*** حقيقة الأمر عن هندسة إقليدس انحرافاً يجعلها أكثر تعقيداً من هندسة لوباتشفسكي، حتى على صعيد الأبعاد الأصغر بكثير من الأبعاد الكونية. وعلى رغم ذلك يظل هذا الانحراف ضئيلاً إلى أبعد الحدود على مستوي تجاربنا المباشرة.

ولقد امتلكت هندسة إقليدس عقولنا (أو عقول أسلافنا) لما بدا عليها من أنها تعطي وصفاً صادقاً لبنية المكان في عالمنا، حتى لقد ساد الاعتقاد بأنها ضرورة منطقية وأن لدينا اعتقاداً ***غريزياً*** في طبيعتنا، سابقاً للتجربة، بأن الهندسة الإقليدية ***يجب*** أن تنطبق على العالم الذي نعيش فيه. (حتى لقد أعلن الفيلسوف العظيم كانط Immanuel Kant ذلك صراحة). ولم يتزعزع هذا الاعتقاد فعلياً إلا حين أتت نسبية أينشتين العامة. التي طُرحت بعد سنوات عديدة. حقاً أن هندسة إقليدس ليست ضرورة منطقية، إلاّ أن انطباق هذه الهندسة بدقة كبيرة -وإن لم يكن انطباقاً تاماً- على بنية مكاننا الفيزيائي، هو حقيقة تؤكدها المشاهدة التجريبية

الحسية. لذلك كانت هندسة إقليدس فعلا، منذ البدء، نظرية ***فيزيائية فخمة***، فضلاً عن كونها قسماً منطقياً أنيقاً من أقسام الرياضيات البحتة.

ولم تكن وجهة النظر هذه، في الحقيقة، بعيدة كل البعد عن وجهة النظر التي أخذ بها أفلاطون (حول العام 360 ق.م وكان ذلك قبل كتاب إقليدس الشهير في الهندسة، أي ***الأوليات Elements***، بما يقرب من خمسين سنة). فقد كانت الأشياء التي تدرسها الهندسة البحتة، كالخطوط المستقيمة والدوائر والمثلثات والمستويات، إلخ، هي، من وجهة نظر أفلاطون، لايمكن تحقيقها على صعيد عالم الأشياء الفيزيائية الفعلية. لأن هذه الأشياء بمعناها الرياضي الدقيق، التي تدرسها الهندسة البحتة، موجودة بدلاً من ذلك، في عالم مختلف، هو ***عالم أفلاطون*** المثالي † للمفاهيم الرياضية. ولايتكون عالم افلاطون هذا من أشياء ملموسة، بل من "أشياء رياضية"، وإذا كان متفتحاً لنا، فليس ذلك بالطريقة الفيزيائية المألوفة، بل بوساطة الفكر. فكلما تأمل المرء في الحقيقة الرياضية، اتصل عقله بعالم أفلاطون ونفذ فيه بعد تدريب على التفكير والتبصر. وكان أفلاطون ينظر إلى هذا العالم بأنه عالم متميز، وأكثر اكتمالاً من عالم تجربتنا الخارجية المادي، ولكنه مِثله، حقيقي بكل معنى الكلمة. (تذكروا مناقشاتنا في الفصلين الثالث والرابع ص 151,128 ، حول واقعية المفاهيم الرياضية عند أفلاطون). لذلك، لما كانت أشياء هندسة إقليدس البحتة، يمكن دراستها بالفكر، ويمكن الوصول بوساطتها إلى خواص متعددة لهذا العالم المثالي، فقد لاتكون هناك ضرورة إذن لأن يكون "إتقان" عالم التجربة الخارجية الفيزيائي أميناً كل الأمانة في دقته لهذا العالم المثالي. ويبدو أن أفلاطون قد استشف ببصيرته العجيبة، معتمداً على مالابد أنه كان في الحقيقة آنذاك ضبابياً مشتت الوضوح، أن الرياضيات يجب أن تدرس وتفهم لذاتها، وأنه ليس ضرورياً أن تتطلب انطباقها التام على معطيات التجربة الفيزيائية. هذا من جهة، ومن جهة أخرى، لايمكن أن نفهم الأشياء الفاعلة في العالم الواقعي الخارجي فهماً أساسياً إلا بعبارات الرياضيات الدقيقة وحدها، الأمر الذي يعني بلغة عالم أفلاطون المثالي: "إن مغاليقها تنفتح بوساطة العقل".

وقد أسس أفلاطون في أثينا أكاديمية كان هدفه منها تعزيز هذه الأفكار. وكان بين النخبة التي برزت من أعضائها الفيلسوف الذائع الصيت، أرسطو، الذي ترك أبلغ الأثر. غير أننا سنهتم هنا بعضو آخر من أعضائها، هو أقل شهرة إلى حد ما من أرسطو، ولكنه في رأيي عالم أكثر براعة منه، بل هو أحد المفكرين القدماء العظام، إنه الرياضي والفلكي أودوكسوس.

تتضمن الهندسة الإقليدية عنصراً أساسياً مرهفاً – هو في الحقيقة أحد أهم العناصر الأساسية فيها - وإن كان يتعذر علينا اليوم اعتباره عنصراً هندسياً (إذ إن الرياضيين يميلون إلى وصفه بـ "التحليلي" بدلاً من وصفه بـ "الهندسي"). وكان هذا العنصر في الحقيقة هو

---

† أو ما "يسمى عالم المُثُل"

إدخال ***الأعداد الحقيقية***. إذ إن الهندسة الإقليدية تستند إلى الأطوال والزوايا. فلابد لفهم هذه الهندسة من النظر في نوعية "الأعداد" اللازمة لوصف هذه الأطوال والزوايا.

وكان أودوكسوس* (حول العام 408-355 ق.م) أول من طرح تلك الفكرة الأساسية الجديدة (فكرة نوعية الأعداد) في القرن الرابع ق.م. وكانت الهندسة اليونانية في "أزمة" بعد ماااكتشف تلامذة فيثاغورث أن أعداداً من قبيل $\sqrt{2}$ (التي كانت ضرورية للتعبير عن طول قطر مربع بدلالة ضلعه) لايمكن التعبير عنها بكسور عادية [منطَّقة] (أنظر الفصل الثالث ص 113) فقد كانت صياغة القياسات الهندسية (النسب) بدلالة الأعداد الصحيحة (اي النسب بينها) أمراً مهماً عند اليونانيين، وذلك لكي يتمكنوا من دراسة هذه المقادير الهندسية وفقاً لقوانين الحساب. وكانت فكرة أودوكسوس في الأساس هي أن يعطي طريقة لوصف نسب الأطوال (أي نسب الأعداد الحقيقية!) بدلالة أعداد ***صحيحة***. ولكن ماااستطاع عمله هو إعطاء معايير معبر عنها بدلالة عمليات الأعداد الصحيحة، وذلك لكي يقرر متى تكون النسبة بين طولين تزيد على نسبة أخرى، أو هل يمكن اعتبار النسبتين متساويتين تماماً.

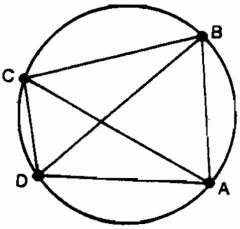
وكانت فكرته بالتقريب هي كما يلي: إذا كانت a و b و c و d أربعة أطوال فإن معيار اليقين بأن النسبة a/b ***أكبر*** من النسبة c/d، هو وجود عددين صحيحين M و N بصورة أنه إذا جمع a إلى نفسه N مرة، وجمع b إلى نفسه M مرة، كان الناتج الأول أكبر من الثاني، وفي الوقت نفسه إذا جمع c إلى نفسه N مرة، وجمع d إلى نفسه M مرة كان الناتج الأول أقل من الثاني** ويمكن استعمال معيار مناسب يوافق التأكد من أن a/b أصغر من c/d. أما للبحث عن معيار لمعرفة هل المساواة $a/b = c/d$ محققة، فهو ببساطة التأكد من أن أياً من المعيارين السابقين لايمكن أن يتحقق.

و لم تأخذ نظرية الأعداد الحقيقية شكل نظرية رياضية مجردة محكمة كل الإحكام إلا في القرن التاسع عشر على يد رياضيين مثل ديديكند **Dedikend** وفايرشتراس **Weierstrass**. ولكن الطريقة المتبعة سارت في الحقيقة في سبل شبيهة جداً بتلك التي اكتشفها أودوكسوس سابقاً منذ مايقرب من اثنين وعشرين قرناً. ولسنا هنا بحاجة لعرض هذا التطور الحديث الذي ألمحنا إليه إلماحة غامضة في الفصل الثالث على الصفحة 113. ولكني فضلت، لسهولة العرض، أن تبنى دراسة الأعداد الحقيقية، في ذلك الفصل، على

* كان أودوكسوس أيضاً أول من طرح نظرية الحركة الكوكبية **المفيدة** التي استمرت قرابة 2000 عام، ثم طورها فيما بعد، وبتفصيل أكثر، هيباركوس وبطليموس وعرفت بعد ذلك باسم "النظام البطليموسي".

** أو بلغة العصر: تؤكد هذه الإجراءات وجود كسر M/N بصورة أن $a/b > M/N > c/d$. ولابد أن يوجد دائماً مثل هذا الكسر الواقع بين العددين الحقيقيين a/b و c/d إذا كان $a/b > c/d$، وهكذا يتحقق معيار أودوكسوس فعلاً.

النشــر العشـري الأكثـر شــيوعاً (وكـان سـتيفن Stevin قـد ابتكــر هـذا النشــر في عــام 1585)[†] . والجدير بالذكر هنا هو أن كتابة النظـام العشـري المألوفـة لدينـا لم تكـن في الحقيقـة معروفة عند اليونانيين.



الشكل 5-3: تنص نظرية بطليموس على أنه تتحقق في هذا الشكل الرباعي الدائري العلا:

$$AB \times CD + AD \times BC = AC \times BD$$

على أن هناك فرقاً هاماً بين عرض أودوكسوس وعرض ديديكند وفايرشـتراس. فاليونـانيون القدماء كانوا ينظرون إلى الأعداد الحقيقية على أنها أشياء تعطى (أو تتعين) بدلالة (نسـبة بـين) مقادير هندسية، أي أنها خاصة من خواص المكان "الفعلـي". وكـان ذلـك ضرورياً لهـم لكـي يستطيعوا التعبير عن المقادير الهندسية بلغة الحساب، وتكون براهينهـم المتعلقـة بهـا وبمجاميعهـا وجداءاتها (التي هي مقومات أساسية في العديد من نظريات القدمـاء الهندسـية المدهشـة) متينـة قوية (ولقد قدمت في الشكل 5-3 رسمـاً يوضـح ***نظرية بطليموس*** الرائعـة الـتي اكتشـفها بعـد أودوكسوس بزمن طويل، وهي تعبر عن ترابط المسافات بين أربـع نقـط علـى الدائـرة وتوضـح الحاجة إلى الجمع والجداء معاً بطريقة بديعة). ولقد أثبتت معايير أودوكسـوس فائدتهـا البالغـة، ولاسيما أنها مكنت اليونانيين من حساب المساحات والحجوم بطريقة دقيقة جداً.

غير أن دور الهندسة تغير بالنسبة لرياضيي القرن التاسع عشـر – وحتـى بالنسـبة للريـاضيين الحاليين في الحقيقة. فقد كانت الأعداد "الحقيقية" عند اليونانيين، ولاسـيما عنـد أودوكسـوس، هي أشياء يُصار إلى ***استخلاصها*** من هندسة المكان الفيزيائي. بينما ننظر نحـن الآن إلى الأعـداد الحقيقية بأنها من الأوليات السابقة منطقياً للهندسة. وهذا مـايتيح لنـا بنـاء كـل أنـواع الأنمـاط ***المختلفة*** من الهندسة، إذ إن كلاً منها ***يبدأ*** من مفهوم العـدد. وكـانت الفكـرة الـتي أفضـت إلى

[†] ربما كانت حيرة اليونانيين تجاه الأعداد التي دعوها "غير العقلية" **irrational** (ودعاها العرب "غير منطّقة" أو "صماء")، يرجع إلى عدم معرفتهم بطريقة كتابة النظام العشري بحسب المنازل. أما المسلمون في العصور الوسطى فلم يكتفوا بأخذ هذه الكتابة عن الهنود، بل أبدعوا الكسور العشرية التي وضعها الكاشي قبل ستيفن بحوالي قرنين وظهر هذا في كتابه "مفتاح الحساب" الذي حققه الأستاذ نادر النابلسي.

ذلك هي الهندسة الإحداثية (التحليلية) التي أدخلها في القرن السابع عشر فيرما وديكارت. إذ يمكن استخدام الاحداثيات فيها في ***تعريف*** أنماط أخرى من الهندسة، بشرط أن تكون كل "هندسة" من هذه الأنواع، متسقة منطقياً. ولكن لاضرورة لأن يكون لها صلة مباشرة بمكان ممارستنا الفيزيائية. أمّا الهندسة الفيزيائية الخاصة التي يُعلن أننا ندركها فهي نتيجة ***تصعيد مدركاتنا التجريبية إلى حالة مثالية*** (ترتبط مثلاً بسحب نتائجها إلى حجم كبير أو صغير إلى درجة غير محددة. أنظر الفصل الثالث ص 119). غير أن هناك اليوم تجارب تكفي دقتها لأن نقول بأن هندستنا التي نمارسها تختلف في الحقيقة عن المثالي الإقليدي (أنظر ص 256)، وأنها تتسق مع ماتقول به نظرية أينشتين النسبية العامة. ولكن على الرغم من التغيرات التي حدثت الآن في نظرتنا إلى هندسة العالم الفيزيائي، فقد ظل مفهوم أودوكسوس للأعداد الحقيقية، الذي مضى عليه ثلاثة وعشرون قرناً باقياً في صورته الأساسية إلى الآن، ويكوِّن وبالأهمية نفسها كما كان في هندسة إقليدس، مقوماً أساسياً من مقومات نظرية أينشتين. بل إنه في الحقيقة مقوم أساسي في جميع النظريات الفيزيائية الجدية إلى الآن.

وليس الكتاب الخامس من سفر إقليدس ***(الأوليات)*** في أساسه، سوى عرض "لنظرية النسبة" المذكورة أعلاه التي أدخلها أودوكسوس، وذلك للأهمية العميقة التي تحتلها هذه النظرية في السفر بمجموعه. بل إن كتاب ***الأوليات*** Elements بكامله الذي نشر لأول مرة في عام 300 ق.م تقريباً، يجب أن يصنف في الحقيقة بين أعمق الكتب تأثيراً في كل العصور. فقد أرسى أسس مرحلة شملت مايقارب كامل التفكير العلمي والرياضي الذي تلاه. لأن طرائقه كانت استنتاجية تنطلق بصورة واضحة من بديهيات مثبتة [حسياً] افترض أنها خواص "واضحة من ذاتها" للمكان. ثم اشتقت منها نتائج عديدة كان كثير منها مدهشاً وهاماً وغير واضح على الإطلاق من ذاته. لذلك، لاجدال في أن عمل إقليدس كان عميق الأثر بالنسبة لتطور التفكير العلمي فيما بعد.

ولاشك أن أعظم رياضي في العصر القديم هو أرخميدس (287-212 ق.م) فقد استخدم نظرية أودوكسوس في النسبة استخداماً عبقرياً واستنتج بواسطتها مساحات العديد من الأشكال المختلفة أو حجومها، منها الكرة أو ماهو أكثر تعقيداً منها، كالقطع المكافئ والحلزون. ونحن اليوم، يمكن أن نستخدم لحسابها حساب التفاضل والتكامل. ولكن مافعله أرخميدس كان قبل هذا الحساب في صورته التي أدخلها نيوتن وليبنتز بما يقرب من تسعة عشر قرناً (بل نستطيع القول: لقد توصل أرخميدس فيما مضى إلى نصف هذا الحساب – هو النصف المتعلق "بالتكامل"). وكانت درجة المتانة الرياضية التي توصل إليها أرخميدس لامأخذ عليها، حتى في مقاييسنا الحديثة. كما تركت كتاباته أثراً عميقاً عند الرياضيين والعلماء المتأخرين، أعظمهم غاليليو ونيوتن. وقد أدخل أرخميدس أيضاً نظرية التوازن **الفخمة** في الفيزياء (أعني القوانين التي تتحكم بالأجسام المتوازنة، كقانون الرافعة والأجسام الطافية أو الغاطسة في الماء).

وقد طورها على صورة علم استنتاجي بطريقة مماثلة للطريقة التي طور بها إقليدس علـم هندسـة المكان وهندسة الأجسام الصلبة.

وعليَّ أن أذكر هنا أيضاً أحد معاصري أرخميدس، وهو أبولونيـوس (حـول 262-200 ق.م) وهو رياضي عظيـم جـداً يتمتـع ببصـيرة وفطنـة عميقتـين. وكـان لدراسـته في نظريـة القطـوع المخروطية أثر كبير في أعمال كبلر ونيوتـن، فقـد تبـين بصـورة رائعـة أن هـذه الأشـكال، هـي بالتحديد ماكان يلزمهما لوصف مدارات الكواكب.

ديناميك غاليليه ونيوتن

كان فهم *الحركة* أعمق انتصار حمله القرن السابع عشر للعلـم. فقـد كـان لـدى اليونـانيين القدماء فهم رائع لتوازن الأجسام – أي الأشكال الهندسية الصلبة، أو الأجسام *المتوازنة* (أعـني الأجسام في حالة تعادل القوى كلها، ولاوجود للحركة فيها) – ولكن لم يكن لدى اليونـانيين مفهوم جيد عن القوانين الـتي تسـري علـى الطريقـة الـتي *تتحـرك* بهـا الأجسـام، لأن ماكـانوا يفتقرون إليه هو نظرية جيدة في *الديناميك*، أعني نظريـة في الطريقـة البديعـة الـتي تتحكـم بهـا الطبيعة فعلاً في تغيير وضع الأجسام من لحظة إلى التالية. ويعود بعض السـبب في ذلـك (وليـس كله بأية حال) إلى غياب الوسائل الدقيقة لقياس *الزمن*، أعني عدم توافر "ساعة" جيدة مقبولـة. لأن وجود ساعة من هذا القبيل كان ضروريـاً لتوقيـت تغـيرات وضـع الجسـم بدقـة واسـتنتاج سرعة الجسم وتسارعه بصورة جيدة. ولذلك، كـانت ملاحظـة غاليليـه عـام 1583 بأنـه يمكـن استخدام الرقـاص Pendulum وسـيلة موثوقـة لضبـط الزمـن، ذات أهميـة قصـوى بالنسـبة لـه (ولتطور العلم بكامله!). لأن متابعة الحركة مع مرور الزمن يمكـن عندئـذ أن تتـم بدقـة. وبعـد خمس وخمسين سنة على هذه الملاحظة، انطلق موضوع الديناميك الجديد مع نشر كتاب غاليليه الذي يحمل عنوان Discorsi (أي الخطاب) عام 1638، وبذلك بدأ عهد التحول من النظريـات الغيبية القديمة إلى العلم الحديث.

ولإعطاء مثال على ذلك سوف أنتقي *أربعة* أفكار فحسب هي من أهم الأفكار التي أدخلها غاليليه في الفيزياء. فقد بين أولاً أن القـوة الـتي تؤثـر في جسـم تُعيِّـن *تسـارعه*، وليـس متجهـة سرعته. ولكن مااللذي يعنيه هذان التعبيران "*تسارع*" و"*متجهة سرعة*" في الواقع؟ إن "متجهـة سرعة" جسيم – أو نقطة على جسم ما – هو معدل تغير وضع هذه النقطة بالنسبة إلى الزمـن. فهذه السرعة تعبر عادة في الفيزياء عن مقدار متجه، أي يـأخذ في الحسـبان اتجـاه السـرعة بمثـل ماياخذ كميتها (التي نسميها السرعة من دون إضافة، أنظـر الشـكل 5-4) أمّـا التسـارع (وهـو أيضاً مقدار متجه) فهو معدل تغير متجهة السرعة بالنسـبة لـلزمن – فالتسـارع في الحقيقـة هـو *معدل التغير لمعدل تغير موضع الجسم بالنسبة للزمن*! (وهذا ماكان يصعب علـى القدمـاء أن يعبروا عنه بسبب افتقارهم للساعات الكفؤة والأفكار الرياضية ذات الصلـة الـتي تتعلـق بمعـدل

التغير). وقد أكد غاليليه أن القوة المؤثرة في جسم (وهي عنده الثقالة فقط) تضبط تسارعه وليس متجهة سرعته مباشرة كما كان يعتقد القدماء من أمثال أرسطو.



الشكل 5-4: متجهة السرعة والسرعة والتسارع

وفي الحالة الخاصة التي لاتوجد فيها قوة ما، تكون متجهة السرعة ثابتة – لذلك يؤدي ***غياب*** القوة إلى بقاء الحركة في خط مستقيم من دون تغيير (وهذا قانون نيوتن الأول). أو أن الأجسام التي تتحرك حركة حرة، تتابع طريقها بانتظام ولاتحتاج إلى قوة لكي تحافظ على سيرها. وقد كانت تلك بالفعل، هي إحدى نتائج قوانين الديناميك التي طورها غاليليه ونيوتن، وهي أن الحركة المستقيمة المنتظمة لاتتميز، من وجهة النظر الفيزيائية، عن حالة السكون (أي انعدام الحركة). وكان غاليليه بوجه خاص واضحاً في هذه النقطة (وحتى أوضح مما كان نيوتن) وقد أعطى وصفاً حياً لها بمثال عن مركب في البحر (راجع Drake 1953 ص -7- 186).

> إذا أوصدت على نفسك وعلى صديق لك أبواب القمرة الرئيسية الواقعة تحت ظهر مركب كبير، وحملت معك إلى هناك بعض الذبابات والفراشات والحيوانات الأخرى الصغيرة الطائرة، وحملت معك أيضاً قدراً كبيراً مملوءاً بالماء وفي داخله بعض السمكات الصغيرة. وعلقت قنينة في سقف القمرة وجعلتها تنسكب قطرة فقطرة داخل وعاء واسع تحتها، عندئذ ستلاحظ إذا تمعنت وكان المركب واقفاً، كيف تطير الحيوانات الصغيرة بالسرعة نفسها في كل جوانب القمرة، وكيف تسبح السمكات في جميع الاتجاهات من دون تمييز. وكيف تتساقط القطرات على الوعاء الذي تحتها. والآن افرض أنك، بعد أن راقبت هذه الأشياء بعناية، راح المركب يجري بالسرعة التي تريدها، ولمدة طويلة بحركة منتظمة من دون أن يتأرجح إلى هذه الناحية أو تلك ، إنك لن تلاحظ أدنى تغيير في كل هذه الأفعال المدرجة أعلاه ، كما لن تستطيع أن تعلم من أي منها : هل المركب يجري أم لايزال واقفاً .... فقطرات الماء ستتساقط في الوعاء تحتها كما كانت من قبل من دون أن يتساقط أي منها نحو الجوانب ، على الرغم من أن المركب يكون قد سار عدة خطوات عندما كانت القطرات لاتزال في الهواء. وستسبح السمكات نحو مقدمة الوعاء بالجهد

نفسه الذي تسبح فيه نحو الخلف وستتوجه بالسهولة نفسها نحو الطعم مهما كان المكان الذي وضع فيه عند جوانب القدر. كما ستواصل الفراشات والذبابات طيرانها من دون تمييز نحو أي جانب كان، ولن يحدث أبداً أن تتجمع عند مؤخرة المركب وكأنها قد تعبت من ملاحقته في جريه، وانفصلت عنه خلال كل مدة طيرانها في الهواء.

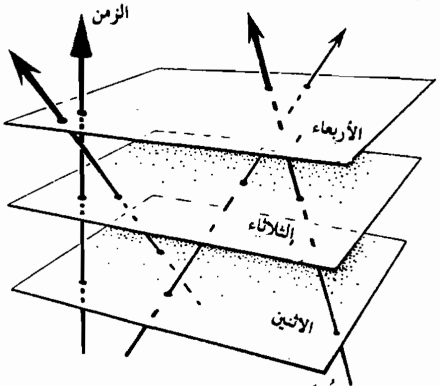
إن هذا الواقع الهام الذي يدعى ***مبدأ نسبية غاليليه***، هو واقع حاسم في حقيقة الأمر، جعل وجهة نظر كوبرنيكوس معقولة ديناميكياً. إذ إن كوبرنيكوس (أو كوبرنيك) (1473-1543) Nicolai Copernicus والفلكي اليوناني القديم أرسطرخوس (حول 310-230 ق.م) الذي سبق كوبرنيك بثمانية عشر قرناً (والذي يجب ألا نخلط بينه وبين أرسطو) طرحا تصوراً قالا فيه إن الشمس تبقى ساكنة، بينما تتحرك الأرض في مدار حولها مثلما تدور أيضاً حول محورها. فياترى لماذا لاندرك هذه الحركة التي قد تصل إلى مايقرب من 100 000 كيلو متر في الساعة؟ لقد طرح هذا السؤال في الحقيقة، قبل مجيء غاليليه بنظريته الديناميكية، معضلةً عميقة وأصيلة أمام وجهة نظر كوبرنيكوس. إذ لو كانت وجهة نظر "أرسطو" القديمة في الديناميك صحيحة، أي لو كان السلوك الديناميكي لمنظومة ما يتعين ***بمتجهة سرعتها*** الفعلي، لكانت حركة الأرض حتماً حقيقة واضحة لنا مباشرة. ولكن نسبية غاليله كشفت بوضوح كيف يمكن أن تكون الأرض متحركة برغم أننا لانستطيع أن ندرك هذه الحركة مباشرة *.

لنلاحظ أن قولنا عن شيء إنه "ساكن" لم يعد يفيد بعد نسبية غاليليه معنى فيزيائياً موضعياً. الأمر الذي تترتب عليه حالاً نتيجة مهمة بالنسبة للطريقة التي ننظر بها إلى المكان والزمان. لأن الصورة التي كوناها غريزياً عن المكان والزمان هي أن "المكان" نوع من الحلبة التي تحدث فيها الحوادث الفيزيائية. فقد يكون الشيء الفيزيائي في نقطة في المكان في لحظة ما، ثم في لحظة بعدها إما في النقطة نفسها أو في نقطة أخرى مختلفة في المكان. فنحن نتصور أن النقط في المكان تبقى، بطريقة ما، في مكانها من لحظة إلى أخرى، مما يعني أن قولنا إن هذا الشيء الفيزيائي قد غير فعلاً موضعه في المكان أو لم يغيره هو قول له معنى. ولكن نسبية غاليليه تقول إنه ليس لعبارة "حالة سكون" معنى مطلق، لذلك ليس لعبارة "في النقطة نفسها في المكان، في زمنين مختلفين" معنى. بالفعل، أين هي النقطة من مكان التجربة الفيزيائي الإقليدي الثلاثي الأبعاد، التي هي، في لحظة ما، النقطة "نفسها" من مكاننا الإقليدي الثلاثي الأبعاد، في لحظة أخرى؟ في الحقيقة لاسبيل للقول أين هذه النقطة. وليس أمامنا إلا أن نقول: "يبدو من

---

* حرصاً على الأمانة، فإن هذا لايصح إلا على قدر مانستطيع أن ننظر إلى حركة الأرض بأنها قريبة من المنتظمة، وبخاصة، من غير دوران. والحقيقة أن حركة الأرض الدورانية لها آثار ديناميكية (صغيرة نسبياً) يمكن كشفها. وأجدر هذه الآثار بالذكر، انحراف الرياح بطرق تختلف في نصف الكرة الشمالي عنها في نصفها الجنوبي. ولقد ظن غاليليه أن عدم الانتظام هذا هو المسؤول عن ظواهر المد والجزر.

الضروري أن يكون لدينا في كل لحظة من الزمان مكان إقليدي جديد كل الجدة". الأمر الذي نتخذ لفهمه صورة للواقع الفيزيائي هي صورة ***زمكان (زمان – مكان) رباعي الأبعاد*** (أنظر الشكل 5-5) تؤخذ فيه الفضاءات الإقليدية الثلاثية الأبعاد الموافقة للأزمنة المختلفة مستقلة بعضها عن بعض. ولكن هذه الفضاءات متصلة، وتكوّن معاً صورة الزمكان الرباعي الأبعاد بأكملها، فتوصف فيه تواريخ الجسيمات التي تتحرك حركة مستقيمة منتظمة بأنها خطوط مستقيمة (تسمى خطوط الكون) في الزمكان. وسنعود فيما بعد، في سياق الحديث عن نسبية أينشتين إلى مسألة الزمكان هذه وإلى نسبية الحركة. وسنجد هناك أن الحجة التي تدعم رباعية أبعاد الفضاء هي عندئذ، أقوى بكثير مما ذكر أعلاه.



الشكل 5-5: الزمكان الغاليلي: تُصوَّر الجسيمات المتحركة حركة منتظمة في صورة خطوط مستقيمة.

وكانت ثالثة أفكار غاليليه العظيمة هي الخطوة الأولى في فهم **انحفاظ الطاقة**، وإن كان غاليليه قد عُني بالدرجة الأولى بحركة الأجسام تحت تأثير الثقالة فحسب. فقد لاحظ أن الجسم الساكن إذا أفلت، ليسقط سقوطاً حراً، أو ليتأرجح بهيئة رقاص ذي طول اختياري، أو لينزلق نازلاً على مستوٍ مائل أملس. فإنه في جميع هذه الأحوال تتوقف سرعته عند أي نقطة يصل إليها على المسافة التي قطعها ***فحسب***. وعلاوة على ذلك، تكفي هذه السرعة دائماً لإعادته إلى الارتفاع الذي بدأ منه لأكثر. أو كما نقول حالياً، إن الطاقة المخزونة عند ارتفاعه عن الأرض (الطاقة الكامنة للثقالة)، يمكن أن تتحول إلى طاقة في حركته (أي طاقة حركية تتوقف على ***سرعة الجسم***) وبالعكس، ولكن الطاقة بكاملها لاتزيد ولاتنقص.

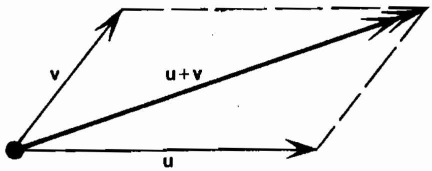
ذلك هو قانون انحفاظ الطاقة. إنه مبدأ فيزيائي مهم جداً وليس أحد المتطلبات الفيزيائية التي تضاف بصورة مستقلة، بل هو ***نتيجة*** لقوانين نيوتن الديناميكية التي سنصل إلى الحديث عنها بعد قليل. ولقد قام، عبر القرون ديكارت وهويجنز وليبنتز وأويلر وكلفن بصياغة هذا القانون في صيغ شتى كانت تزداد فهماً وشمولاً عبر السنين. وسنعود إليه فيما بعد في الفصل السابع. وقد تبين أنه عندما يجمع مع مبدأ النسبية عند غاليليه يثمر مزيداً من قوانين الانحفاظ

المهمة أيضاً، مثل قانون انحفاظ ***الكتلة والاندفاع*** *conservation of mass and momentum* . إن اندفاع جسيم ما هو جـداء كتلتـه في متجهـة سـرعته. ولدينـا أمثلـة مألوفـة عـن مبـدأ انحفـاظ الاندفاع تظهر عند اطلاق الصواريخ، إذ إن الزيادة في اندفاع الصاروخ إلى الأمام تتعادل كليـاً مع الاندفاع المرتد للغازات المستنفدة (الأقل من الصاروخ كتلة، ولكن السريعة بما يكافئ فـرق الكتلة). ويتجلى انحفاظ الاندفاع أيضاً في ظاهرة ارتداد المسدس عند الإطـلاق. وهنـاك نتيجـة أخرى لقوانين نيوتن، وهي حفظ ***الاندفاع الزاوي*** **angular momentum** الـذي يفسـر بقـاء منظومة ما تدور حول نفسها باستمرار. فدوران الأرض حـول محورهـا ودوران كـرة المضـرب حول نفسها، يحافظان على القيمة ذاتها بفضل انحفاظ اندفاعيهما الزاويـين. ويحسـب الاندفـاع الزاوي لجسم ما، حول محور دورانه، بجمـع الاندفاعـات الزاويـة لكـل جسـيم مـن الجسـيمات المكونة له والتي تساهم جميعها في هذا الاندفـاع. وتحسـب مسـاهمة كـل جسـيم بـأخذ جـداء اندفاعه في بعده عن محور الدوران (ونتيجة لذلك، إذا انكمش الجسم عند دورانه حـول محـور، تزداد سرعته الزاوية. وهذا ما يُستفاد منه في الألعاب المدهشة – ولكن المألوفة – التي يقوم بهـا غالباً المتزلجون ولاعبو الأراجيح. لأنهم حين يطوون أذرعهم أو أرجلهم فجأة، يزيـدون بذلـك حالاً من سرعة دورانهم، والسبب في ذلك هو مبدأ انحفـاظ الاندفـاع الـزاوي لاغـير. وسـنرى فيما بعد أن الكتلة والطاقة *والاندفاع الـزاوي* *angular momentum* هـي مفـاهيم لهـا أهميتهـا الكبيرة

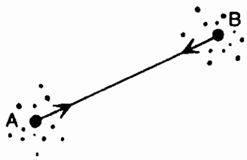
وأخيراً، عليَّ أن أذكّر القارئ بإلهام غاليليه النبوئي القائل إن الأجسـام كلهـا تسـقط تحـت تأثير الثقالة بمعدل تغير السرعة نفسه في حال انعدام الاحتكاك الجوي. (قد يذكـر القـارئ قصـة غاليليه الشهيرة عندما أسقط أجساماً مختلفة كلها معاً من برج بيزا المائل) ولقد أدى هذا الإلهـام نفسه بأينشتين، بعد ثلاثة قرون، إلى تعميـم مبـدأ النسـبية علـى منظومـات الإسـناد المتسـارعة، فكان له، كما سنرى قبل نهاية هذا الفصل، حجر الأساس في نظريـة الثقالـة الـتي اشـتقها مـن النسبية العامة.

وقبل أينشتين، كان نيوتن قادراً علـى أن يـبني، فـوق الأسـس المتينـة الـتي أرسـاها غاليليـه، صرحاً رائعاً بعظمته. فقد أعطى ثلاثة قوانين تنظم سير الأجسام المادية. وكان أولهـا وثانيهـا في أصولهما هما اللذين أعطاهما غاليليه، الأول: إن الجسم الذي لاتؤثر فيه أية قوة، يظل متحركـاً بانتظام في خط مستقيم. والثاني: إذا أثرت قوة في الجسم، فإن جداء كتلتـه عندئـذٍ في تسـارعه (أي معدل تغير اندفاعه) يساوي تلك القوة. أما القانون الثالث فكـان مـن إلهـام نيوتـن نفسـه، الذي أدرك بوساطته الحاجة إلى إضافة قانون ثالث إلى الاثنين السابقين لينص فيه على أن القـوة التي يؤثر بها جسم A في جسم B، تساوي وتعـاكس بـالتحديد القـوة الـتي يؤثـر بهـا B في A (لكل فعل، رد فعل يساويه ويعاكسه). وهكذا أصبحت هذه القوانين الثلاثة الهيكـل الأساسـي للميكانيك. ويتألف "الكون النيوتني" مـن جسـيمات تتجـول في الفضـاء الـذي يخضـع بـدوره

لقوانين هندسة إقليدس، كما تتعين فيه تسارعات هذه الجسيمات بالقوى التي تؤثر فيها. أما القوة التي تؤثر في كل جسيم، فتحسب بجمع كل القوى المنفصلة التي تساهم في التأثير في الجسيم (***جمعاً*** متجهياً. أنظر الشكل 5-6)، والتي مبعثها كل الجسيمات ***الأخرى***. لذلك لابد، لتعيين المنظومة تعييناً كاملاً، من تحديد قاعدة نعرف بها ماهي القوة التي تؤثر في الجسيم A، والتي يكون مبعثها هو جسيم آخر B. ونحن نفترض عادة أن يكون تأثير هذه القوة في اتجاه المستقيم الممتد بين A و B (انظر الشكل 5-7). فإذا كانت القوة ثقالية، عندئذ يكون تأثيرها تجاذبياً بين A و B، وشدتها متناسبة مع حداء الكتلتين ومقلوب مربع المسافة بينهما، أي بحسب ***قانون التربيع العكسي***. أمّا بالنسبة لأنواع القوى الأخرى، فقد تكون علاقتها بالمسافة مختلفة عن هذه (الثقالية)، بل ربما كانت القوة تتوقف على خاصة أخرى للجسيمات غير كتلها.



الشكل 5-6: قاعدة متوازي الأضلاع في الجمع المتجهي



الشكل 5-7: تؤخذ القوة بين جسيمين في اتجاه المستقيم الواصل بينهما (وبحسب قانون نيوتن الثالث، تكون القوة المؤثر في A، والناشئة عن B مساوية ومعاكسة دائماً لقوة تأثير B في A.

لقد لاحظ كبلر العظيم Johannes Kepler (1571-1630) المعاصر لغاليليه، أن مدارات الكواكب حول الشمس هي ***قطوع ناقصة*** وليست دوائر. (وتقع الشمس دائماً في أحد محرقي القطع، وليس في مركزه). كما توصل كبلر إلى قانونين آخرين يتحكمان بمعدل السرعة التي تُرسم بها هذه المدارات الإهليلجية. ولكن نيوتن كان قادراً على أن يثبت أن قوانين كبلر الثلاثة هي نتيجة لمشروعه العام (أي لمشروع نيوتن) الذي ينظم الأشياء (والذي يدخل فيه قانون تربيع عكسي لقوى التجاذب). ولم يكتف بذلك، بل أتى بمختلف أنواع التصحيحات على مدارات كبلر الإهليلجية، إضافة إلى نتائج أخرى مثل مبادرة الاعتدالين (وهي الحركة البطيئة التي يقوم بها منحى محور دوران الأرض. وكان اليونانيون قد لاحظوها قبل ذلك بقرون)

ولقد طور نيوتن، للقيام بذلك كله، عدداً من التقنيات الرياضية. إضافة إلى حساب التفاضل والتكامل. والسبب الأكبر في نجاح جهوده المتميز، يرجع إلى مهاراته الرياضية الفائقة التي لايضاهيها سوى بصيرته الرائعة الثاقبة في الفيزياء.

عالم ديناميك نيوتن الآلي

يمتاز مشروع نيوتن العام بأنه إذا ماأضيف إليه القانون النوعي الخاص بالقوى (كقانون التربيع العكسي للثقالة)، يترجم عندئذٍ إلى مجموعة معادلات ديناميكية محددة ودقيقة، فإذا حددت في لحظة معينة مواضع مختلف الجسيمات ومتجهات سرعها وكتلها تعينت عندئذٍ بطريقة رياضية مواضع هذه الجسيمات ومتجهات سرعها (وكتلها – ولكن هذه يفترض بأنها ***ثابتة***) في جميع اللحظات التالية. فهذه الخاصة، بالصورة التي يتميز بها عالم نيوتن الميكانيكي هي نوع ***من الحتمية***. وقد كان لها (ولايزال) أثر عميق في التفكير الفلسفي. فدعونا نحاول فحص طبيعة هذه الحتمية النيوتنية بالاقتراب أكثر قليلاً منها. ترى ماالذي يمكن أن نعرفه منها عن مسألة "حرية الإرادة"؟ أمن الممكن أن يحوي عالم نيوتني خالص عقولاً [كعقولنا]؟ أو هل يمكن لعالم نيوتن أن يحوي على الأقل آلات حاسبة؟

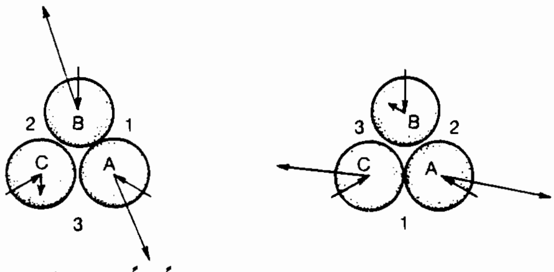
سنحاول أن نكون دقيقين وواضحين إلى الحد المعقول بشأن هذا النموذج النيوتني للعالم. فمثلاً، نستطيع أن نفترض أننا نظرنا إلى الجسيمات كلها التي تكون المادة، بأنها نقاط هندسية. أعني أنه ليس لها أي امتداد مكاني مهما كان. أو يمكن أن ننظر إليها كلها، بدلاً من ذلك، بأنها كريَّات صلبة. ويجب أن نفترض في كل من الحالتين أننا نعرف قوانين القوة المؤثرة بين هذه الجسيمات، كقانون التربيع العكسي مثلاً للتجاذب في نظرية نيوتن الثقالية. وسنحتاج إلى وضع نماذج للقوى الأخرى أيضاً في الطبيعة، كالقوى ***الكهربائية والمغنطيسية*** (التي درسها في البدء بالتفصيل جلبرت **William Gilbert** في عام 1600)، أو القوى النووية الشديدة التي يعرف الآن بأنها تربط الجسيمات (البروتونات والنترونات) معاً لتكوّن النوى الذرية. فأما القوى الكهربائية فتشبه القوى الثقالية بأنها تحقق أيضاً قانون التربيع العكسي، مع الفارق بأن الجسيمين المتشابهين [بالشحنة] ***يدفع كل*** منهما الآخر (بدلاً من أن يُجذبه كما في الثقالة). وتعمل ***شحنة الجسيمين*** (وليس كتلتهما) على تحديد شدة القوة الكهربائية. وتتبع القوى المغنطيسية أيضاً قانون "التربيع العكسي" مثل القوى الكهربائية* . ولكن القوى النووية تختلف في علاقتها بالمسافة كل الاختلاف، لأنها تكون شديدة إلى حد بعيد حين تكون المسافة بين

---

* الفرق بين الحالة الكهربائية والحالة المغنطيسية هو أن "الشحنة المغنطيسية" المعزولة (أي قطب شمالي وحده، أو جنوبي وحده) لاوجود لها كما يبدو في الطبيعة، لأن الجسيم المغنطيسي يؤلف دائماً مايدعى "ثنائي القطبين" فهو مغنطيس دقيق (له قطب شمالي وقطب جنوبي لايمكن فصلهما).

الجسيمات صغيرة جداً، كما هو الحال داخل النواة الذرية، لكنهـا تصبـح مهملـة حـين تصبـح المسافة أكبر من ذلك.

لنفرض أننا أخذنا بالنسبة للجسيمات بصورة الكريات الصلبة، مع اشتراطنا أن أي كرتـين منها ترتدان عند تصادمهما ارتداداً تام *المرونة*. ونعني بذلك أنهما تنفصلان ثانيـة مـن دون أن تفقدا شيئاً من طاقتهما (أو من اندفاعهما الكلي)، كما لو أنهما كانتا كرتي بليار. كمـا يجـب أن نحدد أيضاً بدقة كيف تؤثر *القوى* بين كرة وأخرى. وللسهولة، نستطيع أن نفترض أن القوة التي تؤثر بها كرة في أخرى، هي على امتداد الخط الواصل بين مركزيهما وأن شدتها هـي دالّـة تعيِّنها المسافة بين الكرتين (وهذا الفرض سار تلقائياً على الثقالة النيوتنيـة بحسـب نظريـة رائعـة وضعها نيوتن، أمّا بالنسبة لقوانين القـوى الأخـرى فيمكـن الالـتزام بـه كشـرط يجعـل الأمـور متسقة) ولكن بشرط ألاّ تتصادم الكرات إلاّ مثنى. وليـس ثلاثـاً أو أربـع أو أكـثر كلهـا معـاً، وحينذاك، يسير كل شيء سيراً حسناً، وتكون النتائج مرتبطة ارتباطاً مستمراً بالحالـة الابتدائيـة (ويعني "الاستمرار" هنا أنه إذا طرأ تغير صغير إلى حد كاف على الحالة الابتدائيـة، فإنـه يـؤدي إلى تغير صغير فحسب في النتائج) ولايشكل السلوك إذن في أثناء التصادمات بزاوية ورود شبه معدومة انقطاعاً عن الحالة التي تكاد تخطئ فيها كرة كرة أخرى. ولكن مشكلتنا هي كيف نعالج حالة ا لتصادم ا لـثلاثي أو ا لتصادمات الأعلـى مرتبـة. فلـو تصـادمت ثـلاث كـرات A و B و C كلها معاً، عندئـذٍ يوجد فرق بين أن نرى أن A و B قد التقتا أولاً، وأن C قد صدمت B بعـد ذلك مباشرة، أو أن نرى أن A و C قد التقتا أولاً، وأن B صدمت A بعد ذلك مباشرة (أنظـر الشكل 5-8). فكل تصادم ثلاثي في نموذجنا هذا يـؤدي بنـا إلى ***لاحتميـة مؤكـدة*** (حالـة عـدم تعيين). ولكن يمكن لو شئنا أن ***نسقط*** من حسابنا كل حالات التصادمـات الثلاثيـة أو الأعلـى مرتبة منها، بصفتها حالات "يستبعد جداً حدوثها"، حينذاك يبقى بين أيدينا نمـوذج متسـق إلى حد معقول، أمّا مسألة التصادمات الثلاثية الممكنة فتعني أن محصلـة السـلوك العـام قـد لاتكـون تبعيتها للحالة الابتدائية تبعية مستمرة [بمعنى الاستمرار الذي سبق تعريفه].



الشكل 5-8: التصادم الثلاثي: تختلف نتيجة التصادم اختلافاً تاماً حسبما يكون هذا الزوج من الكريات قد اصطدم أولاً أو ذاك. فهذه عملية تتوقف فيها النتيجة بصورة غير مستمرة على البداية.

فصورة الكرات هذه إذن لاترضي كثيراً. وربما كنا نفضل عليها صورة تعتمد الجسيمات ***النقطية***. ولكن نموذج الجسيمات النقطية يثير بعض الصعوبات النظرية (التي تنشأ من لانهائية القوى والطاقة حين تدنو الجسيمات من التلاقي) التي لابد لتجنبها من وضع فروض أخرى، كفرضنا أن القوى بين الجسيمات تصبح على مسافات صغيرة جداً، قوى دافعة شديدة جداً، وبذلك نضمن فعلاً عدم تصادم أي جسيمين على الإطلاق. (كما ييسر لنا ذلك تجنب الإجابة عن السؤال: ماهي الطريقة التي يفترض أن ***تتصرف*** بها الجسيمات عند تصادمها) ولكني أفضل، لسهولة التصور، أن أعبر عن المناقشة القادمة، باستخدام صورة الكريات الصلبة، فهذا النوع من "كريات البليار" يبدو لي هو صورة النموذج الأقرب أصلاً ***للواقع*** الذي يتصوره عدد كبير من الناس.

والآن (وقد تجاهلنا مسألة التصادم المتعدد الكريات) فإن هذه الصورة للواقع أي صورة كرات البليار النيوتنية[5]، هي في الحقيقة نموذج ***حتمي*** ***deterministic***. والمقصود بكلمة "حتمي" هنا، أن السلوك الفيزيائي للعالم يتعين رياضياً تعييناً كاملاً في كل لحظة من لحظات المستقبل (أو الماضي) بعد معرفة أوضاع الكريات (التي يفترض أن عددها منتهٍ وذلك للخلاص من بعض الصعوبات) ومعرفة متجهات سرعها في لحظة ما من لحظات سيرها. وفي هذه الحال، يبدو أن لامجال "لعقل" لكي يؤثر في سلوك الأشياء المادية بفعل "ارادته الحرة" في عالم كريات البليار هذا. لذلك، لو اعتقدنا بوجود "حرية الإرادة" لبدا لنا أننا ملزمون بالشك بأن عالمنا ***الفعلي*** يمكن أن يكون مكوناً بهذه الطريقة.

وسيلاحظ القارئ أن مسالة "حرية الإرادة" الشائكة التي نوقشت كثيراً، تخيم عبر هذا الكتاب على خلفيته. إلا أنها ستظل عند هذه الخلفية ولن تظهر إلا فيما ندر في معظم ماأرى أن علي أن أقوله. ففي هذا الفصل خاصة، سيكون لها فيما بعد دور واضح محدد، ولكنه صغير (يتعلق بالنتيجة المترتبة على الاشارات الأسرع من الضوء في النسبية). أما في الفصل العاشر فسيطرح هذا الموضوع مباشرة، ولكن القارئ سيمنى هناك بخيبة أمل مما سأقدمه له، حتى أنـي أعتقد فعلاً بأننا سنجد فيه مشكلة حقيقية، لاخيالية، وهي مشكلة عميقة يصعب جداً صياغتها صياغة وافية. إن قضية الحتمية قضية مهمة في النظرية الفيزيائية، ولكني أعتقد بأنها جزء فحسب من قصتنا. فقد يكون العالم على سبيل المثال حتمياً، ولكنه ***غير حسوب***. وهكذا، يمكن أن يكون المستقبل معيناً بالحاضر بطريقة لايمكن، من حيث المبدأ، حسابها. وسأحاول في الفصل العاشر أن أقدم أدلة تثبت أن نشاط عقولنا الواعية هو فعلاً نشاط لاخوارزمي (أعني غير حسوب). فحرية الإرادة التي نعتقد بأنفسنا أننا قادرون عليها، ترتبط تبعاً لذلك بعنصر غير حسوب في القوانين التي تسير العالم الذي نعيش فيه فعلاً. فالسؤال المهم بالنسبة لنا - سواء أكنا نقبل بوجهة النظر هذه في حرية الإرادة أم لا - ليس أن النظرية الفيزيائية المطروحة (نظرية نيوتن مثلاً) هي حتمية أم لا، بل هل هي ***حسوبة*** أم لا. والحسوبية مسألة أخرى غير مسألة

الحتمية. وهـذه الحقيقـة (***حقيقـة أنهـا مسـألة مختلفـة***) هـي أمـر سـأحاول أن ألح عليـه في هـذا الكتاب.

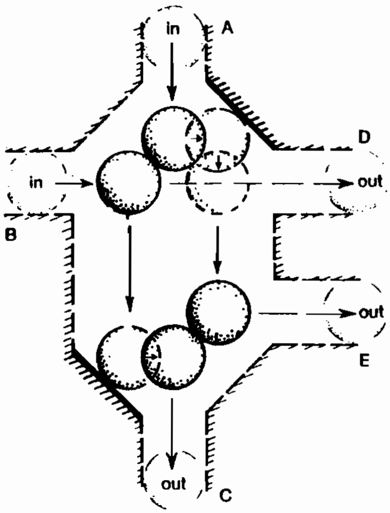
هل الحياة حسوبة في عالم كرات البليار؟

سأوضح أولاً بمثال لامجال لانكار أنه مصطنـع وغـير معقـول أن الحتميـة والحسـوبية أمـران مختلفان، فآخذ "نموذجاً لعالم" يتبين منه أنه يمكن أن يكون حتمياً ولكن غـير حسـوب بـالفعل. لنتصور عالماً توصف "حالته" في كل لحظة بثنائية من الأعداد الطبيعيـة (m,n). ولنفـرض أن T_u هي آلة محددة من آلات تورنغ العامة، أي من النوع الخاص الذي تحدثنا عنه في الفصـل الثـاني (ص86). ولنفرض أيضـاً أنه لكي نقـرر ماالذي سـتؤول إليـه حالـة هـذا العـالم في "اللحظـة" التاليـة، لابـد لنـا مـن أن نتسـاءل هـل سـيتوقف أخـيراً عمـل T_u علـى m أم لا (أعـني هل □ ≠ $T_u(m)$ أم □ = $T_u(m)$ بحسب طريقة التدوين في الفصل الثاني ص88). فإذا كـان هذا العمـل سيتوقف، عندئذٍ تكون حالـة عالمنـا هذا في "اللحظـة" التاليـة هـي (n , 1+ m). أما إذا كـان لن يتوقـف فسـتكون حالتـه التاليـة (m , 1 + n). إن نمـوذج العـالم هـذا حتمـي ولكنه غير حسوب. بالفعل: لقد رأينا في الفصل الثاني أنه لاتوجد خوارزمية لمسألة التوقـف في آلات تورنغ. إذن لايمكن أن يوجد خوارزمي يتنبأ بــ "المستقبل" في نمـوذج العـالم هـذا، على الرغم من الحقيقة الواضحة بأنه حتمي بكل معنى الكلمة!

من المؤكد أن هذا ليس بالنموذج الذي يؤخذ مأخذ الجد، ولكنه يثبت أن ***هنـاك*** سـؤالاً ينتظـر الجواب. لذلك نستطيع أن نتساءل حيال أي نظرية فيزيائية حتمية: هل هي حسـوبة أم لا. فمثـلاً، هل عالم كرات البليار النيوتني حسوب؟

إن قضية الحسوبية الفيزيائية، تتوقف جزئياً على نوع السـؤال الـذي نحـن بصـدد توجيهـه عـن المنظومة. فقد يخطر لفكري عدد من الأسئلة التي يمكن توجيهها والتي يكون ***توقعي*** بالنسـبة لهـا، في حالة نموذج كرات البليـار النيوتـني هـو أن التحقـق مـن الإجابـة مسـألة غـير حسـوبة (أعـني غـير خوارزمية). فقد يكون السؤال من هذا القبيل هو: هل ستصدم الكرة A الكرة B مـرة واحـدة؟ إن الفكرة في هذا السؤال هي أنه إذا أعطينا ***بيانات أولية*** تتضمن أوضاع الكرات ومتجهـات سـرعها في لحظة خاصة (t = o)، فهل نتوصل من هذه البيانـات إلى معرفـة النتيجـة بـأن الكـرة A سـتصدم الكرة B أو لن تصدمها في لحظة قادمة (t > o). ولكي نجعل مسألتنا مـن نوعيـة خاصـة (وإن تكـن غير واقعية) يمكن أن نفرض أن أنصاف أقطار الكرات كلها متساوية وأن كتلها متساوية وأن هناك مثلاً قوة ذات قانون تربيع عكسي بين كل كرتين من هذه الكرات. إن أحد الأسباب التي تدعونـا للتخمين بأن هذه المسألة الخاصة ليست من المسائل التي يمكن حلها خوارزمياً هو أن هذا النمـوذج يشبه نموذج "الحاسوب القائم على كرات البليار" الذي تخيله فردكن Edward Fredkin و توفـولي Tommaso Toffoli (1982). فقد فرض هذان في نموذجهما أن الكرات مقيدة الحركة بعدة جدران

(بدلاً من أن يكون هناك قانون تربيع عكسي للقوة)، وأن كل كـرة منهـا ترتـد ارتـداداً مرنـاً عـن الأخرى بطريقة تشبه كرات نيوتن التي تحدثنا عنها منذ قليل (أنظر الشكل 5-9). وقد بين فردكـن وتوفولي أن جميع العمليات المنطقية الأساسية التي يقوم بهـا حاسـوب مـا،يمكـن أن تجريهـا كـرات نموذجهما.كما يمكن لهذه الكرات أن تحاكي أي آلة من آلات تورنـغ، علـى أن يحـدد كـل اختيـار لآلة تورنغ، الطريقة التي تتشكل بها "الجدران" وما إلى ذلك في آلـة فردكـن - توفـولي. ثـم تُمثّـل معلومات شريط المدخلات في آلة تورنغ بحالة الكرات الابتدائيـة المتحركـة، كمـا تُمثّـل معلومـات شريط المخرجات بحالة الكرات النهائية. وعلى نحو ذلك، لما كان أهم سؤال يمكن أن يطرحه المـرء هو التالي "هل ستتوقف هذه العملية الحسابية أو تلك في النهاية في آلة تورنغ" فـإن هـذا "التوقـف" يمكن التعبير عنه بلغة الكرات بأن الكرة A قد تصادمت في النهاية مع الكـرة B. فالحقيقـة المعروفـة بأن هذا السؤال لايمكن الإجابـة عنـه خوارزميـاً، *توحـي* علـى الأقـل بـأن السـؤال النيوتـني: (هـل سيُصادف أبداً أن تتصادم الكرة A مع الكرة B؟) الذي سبق أن طرحته في البدء، لايمكـن الإجابـة عنه أيضاً بطريقة خوارزمية.



الشكل 5-9: نموذج محولة (اقترحها رسلر A. Ressler) في نموذج حاسوب فردكن وتوفولي فإذا دخلت كرة عند B عندئـذٍ تغـادر فيمـا بعـد كـرة عنـد D (أو عنـد E) بحسـب مـاتكون قـد دخلـت كـرة أخـرى عنـد A (أم لا) (حيث يفترض أن الدخول عند A وعند B يحدث في آن واحد).

إن مسألة نيوتن، والحق يقال، أصعب مراساً بكثير من تلك التي طرحها علينا فردكن وتوفـولي. فقد كان هذان قادرين على تحديد حالات نموذجهما بدلالة متغيرات *متقطعة* (أعني بدلالـة بيانـات من النوع "نعم أو لا" مثل "إما أن الكرة داخل القناة أو لا"). ولكـن مواضـع الكـرات ومتجهـات

سرعها الابتدائية يجب أن تُحدّد في المسألة النيوتنية الحقيقية (غير المبسطة) تحديداً دقيقاً إلى أبعد حد بدلالة إحداثياتها التي هي *أعداد حقيقية*، وليس بهذه الطريقة المتقطعة، وهكذا نواجه من جديد كل المسائل التي كان علينا أن ننظر في أمرها عندما وجهنا في الفصل الرابع السؤال: هل أن مجموعة مندلبروت كرورة. ولكن ماالذي *تعنيه* كلمة "حسوب" حين تُعطى بيانات المدخلات والمخرجات بدلالة متغيرات تتغير تغيراً مستمراً؟ يمكن تسهيل المسألة إلى حين، فنفترض أن كل إحداثيات المواضع ومتجهات السرع الابتدائية، معطاة بأعداد *ناطقة* (على الرغم من أننا لانستطيع أن نتوقع أن تظل هذه الإحداثيات أعداداً ناطقة بعد مرور فترات زمنية قيمها ناطقة. وهنا نذكر أن العدد الناطق هو حاصل قسمة عددين صحيحين، وأنه لذلك معين بحديه المتقطّعين المحدودين [أي أن قيمتها تقفز مثلاً من 1 إلى 2 إلى 3 إلخ..... دون مرورها بالكسور] لذلك يساعد استخدام الأعداد الناطقة على الاقتراب من النتيجة بقدر مانريد، وذلك مهما تكن مجموعة البيانات الابتدائية التي نختارها، ولكن ليس مستبعداً نهائياً، أن نتوقع في حال إعطاء البيانات الابتدائية بأعداد ناطقة، أن *لايكون* هناك *خوارزمية* لكي نقرر هل A و B ستتصادمان في النهاية أم لا؟

وعلى الرغم من ذلك، ليس هذا حقاً مانعنيه من القول مثلاً: "إن عالم كرات البليار النيوتني ليس حسوباً": بالفعل إن النموذج الخاص الذي كنت أقارن معه عالم كرات البليار النيوتني، أعني "حاسوب كرات البليار" المنسوب لفردكن وتوفولي يسير العمل فيه، في الحقيقة، وفقاً لعملية حسابية. وتلك كانت، على الرغم من كل شيء، النقطة الأساسية في فكرة فردكن وتوفولي - وهي أن سلوك نموذجهم سيكون مثل سلوك حاسوب (عام)! فغايتي من ذلك كله هنا هي أن أطرح القضية التالية: هل من المعقول أن يتمكن عقل بشري، عن طريق تسخير قوانين فيزيائية مناسبة غير حسوبة، من أن يقوم بعمل هو، بمعنى ما، أفضل من عمل آلة تورنغ. في الحقيقة، أنه لافائدة ترجى من محاولة الاستعانة بشيء من قبيل:

"إذا لم تتصادم الكرة A أبداً مع الكرة B، تكون الإجابة عن مسألتك هي 'لا'".

إذ على المرء أن ينتظر إلى مالانهاية لكي يكون على يقين بأن الكرات المعنية لن تتلاقى أبداً! فهذا، طبعاً، بالتحديد هو نوع الطريقة *التي تعمل* بها آلات تورنغ.

يبدو في الواقع أن هناك مؤشرات واضحة على أن عالم كرات البليار النيوتني هو عالم حسوب بالمعنى المناسب (على الأقل إذا تجاهلنا مسألة التصادمات المضاعفة) والطريقة التي يمكن أن يلجأ إليها المرء عادة لكي يحاول التنبؤ بسير هذا العالم هي التقريب، فيتخيل لذلك بأن مراكز الكرات تقع على عقد شبكة من النقط التي تحسب احداثياتها، ولنقل، بأجزاء من مئة من الواحدة. كما نفرض أن الزمن نفسه "متقطع" وأن اللحظات الزمنية (الممكنة) التي يمر بها هي مضاعفات لواحدة صغيرة (نشير إليها مثلاً بـ Δt). الأمر الذي يكون باعثاً على وجود

إمكان للانقطاع في قيم السـرعة (الفرق بين إحداثيي عقدتين من عُقَد الشبكة في لحظتين ممكنتين متتاليتين مقسوماً على Δt). أما قيم التسارعات فتحسب بالتقريب المناسب باستخدام قانون القوة، ثم تستخدم هذه التسارعات بدورها لحساب "السرعات" ومنها تحسب أوضاع العقد الشبكية الجديدة في اللحظة الممكنة التالية، وذلك بدرجة التقريب التي نريدها. وهكذا يجري هذا الحساب من لحظة ممكنة إلى أخرى ممكنة إلى أن تتحقق الدقة المطلوبة. ولكن قد يصادف أن نفقد الدقة كلها بعد عدد صغير نسبياً من اللحظات، ولايكون أمامنا عندئذٍ إلا بدء الإجراءات من جديد باستخدام شبكة أدق وفترات زمنية [Δt] أصغر. الأمر الذي يساعد على تحقيق دقة أكبر ومتابعة الحساب لمدة أطول من السابق قبل فقدان الدقة. وهكذا يمكن تحسين الدقة أكثر ومتابعة الحساب لمدة أطول كلما كانت خطوة الشبكة أدق وكان تقسيم الزمن لفترات أصغر. فسلوك عالم كرات البليار النيوتني، يمكن أن يحسب بهذه الطريقة بالدقة التي نريدها (ولكن مع تجاهلنا دوماً للتصادمات المضاعفة) - وبهذا المعنى يمكن أن نقول إن العالم النيوتني حسوب فعلاً.

ومع ذلك، يمكن أن يبدو هذا العالم، بمعنى آخر، غير حسوب ***عملياً***. والباعث على ذلك هو أن الدقة التي يمكن أن ***نعرف*** بها البيانات الابتدائية محدودة دوماً. والواقع أن في هذا النوع من المسائل قدراً كبيراً من "عدم الاستقرار"، وأن أدنى تغير في البيانات الابتدائية يمكن أن يسفر عن تغير هائل في النتائج النهائية (وهذا ماسيفهمه كل من حاول مرة أن يسقط كرة بليار في جيب الطاولة بطريقة غير مباشرة أي بصدمها بكرة أخرى سبق أن صدمها) ويظهر ذلك أكثر مايظهر حين تحدث عدة تصادمات متتالية؛ ولكن هذا السلوك غير المستقر يصادف أيضاً في حالة التأثيرات الثقالية النيوتنية عن بعد (عندما يكون هناك أكثر من جسمين) ففي مثل هذه الحالات يعبر عن عدم الاستقرار بكلمة "شواش" chaos أو "سلوك شواشي"، وللسلوك الشواشي أهميته مثلاً في دراسة الطقس. إذ على الرغم من أن المعادلات النيوتنية لحركة عناصر الطقس معروفة كل المعرفة، إلا أن التنبؤ بالطقس إلى أمد طويل هو، كما نعرف جميعاً، غير موثوق!

ولكن ليس هذا بوجه من الوجوه هو نوع "اللاحسوبية" الذي يمكن أن "نستخدمه". لأنه نوع ناشئ عن أن الدقة التي يمكن أن تعرف بها الحالة الابتدائية محدودة بحد معين لاتتجاوزه، لذلك لايمكن الاطمئنان لتقدير الحالة النهائية في المستقبل من الحالة الابتدائية. وكل ماهنالك في الحقيقة هو أن ***عنصراً عشوائياً*** كان قد تدخل في سير المنظومة في المستقبل. أما إذا كان للدماغ أن يستعين حقاً بعناصر ***مفيدة*** غير حسوبة من القوانين الفيزيائية، فلابد عندئذ أن تكون تلك العناصر ايجابية (موثوقة) ومختلفة كلياً عن السابقة. أما هذا النوع من السلوك "الشواشي"، فلن أطلق عليه، تبعاً لذلك، صفة "اللاحسوبية" بل أفضل عليها صفة "عدم القابلية للتنبؤ".

وهذه الصفة هي ظاهرة شائعة جداً كما سنرى بعد قليل، في القوانين الحتمية الخاصة بالفيزياء (الكلاسيكية) ونحن نسعى طبعاً إلى ***إضعاف*** هذه الصفة، لا إلى "توظيفها" في الآلات الذكية.

ومن الأمور المساعدة على وضع طريقة عامة لدراسة مسائل في الحسوبية وعدم قابلية التنبؤ، اللجوء إلى تبني وجهة نظر حيال قوانين الطبيعة أكثر شمولية من ذي قبل، لأن هذا التبني لن يمكننا من أخذ ميكانيك نيوتن في اعتبارنا فحسب، بل كذلك أخذ النظريات المحسنة التي أتت بعده لتحل محله. لذلك سنحتاج إلى إلقاء نظرة خاطفة على صياغة ***هاملتون*** الرائعة للميكانيك.

ميكانيك هاملتون

لم يكن نجاح ميكانيك نيوتن ناجماً عن إمكانية تطبيقه الرائعة في العالم الفيزيائي فحسب، بل عن غنى وجمال النظرية الرياضية أيضاً التي كان باعثاً على ابتكارها. فقد أثبتت ***جميع*** نظريات الطبيعة ***الفخمة***، بطريقة تلفت النظر، أنها منابع ثرية جداً للأفكار الرياضية. وهذا واقع ينطوي فعلاً على سر عميق بديع يتلخص في أن هذه النظريات ليست رائعة الدقة فحسب بل معطاءة جداً لمجرد كونها ***رياضيات***، الأمر الذي نعرف منه من غير شك شيئاً عميقاً عن الروابط التي تصل عالم تجاربنا الفيزيائية الواقعي بعالم الرياضيات الأفلاطوني (وهذه قضية سأوضح معالمها فيما بعد في الفصل العاشر503). ولربما بلغ ميكانيك نيوتن مرتبة السمو في هذا الميدان، لأن ولادته أتحفتنا بحساب التفاضل والتكامل. هذا فضلاً عن أن المشروع النيوتني كان باعثاً على ظهور حقل رائع من الأفكار الرياضية عرفت باسم ***الميكانيك الكلاسيكي***. فقد ارتبط تطوره بأسماء العديد من عظماء رياضيي القرنين الثامن عشر والتاسع عشر مثل أولر ولاغرانج **Lagrange** ولابلاس **Laplace** وليوفيل **Liouville** وبواسون **Poisson** وجاكوبي **Jacobi** وأوستروغرادسكي **Ostrogradski** وهاملتون. إلاّ أن نظرية هذا الأخير، أي "نظرية هاملتون"[8] تلخص مجمل هذا العمل، لذلك يكفي لتحقيق غرضنا هنا أخذ فكرة بسيطة عنها. وهاملتون هذا، ذو الأصل الإيرلندي (واسمه الكامل **William Rowan Hamilton** (1805-1865)) كان متعدد المواهب – وهو نفسه صاحب دارات هاملتون التي ذكرناها في ص 182. وقد أعطى لنظرية الميكانيك هذا الشكل الذي يبرز تماثل حركة منظومة ميكانيكية مع انتشار الأمواج، مما جعل من هذه الصيغة إلماحة [ثاقبة] للعلاقة بين الأمواج والجسيمات كان لها، إضافة إلى معادلات هاملتون نفسها، أهمية بالغة بالنسبة لتطور ***ميكانيك الكم*** فيما بعد، الأمر الذي سنعود إليه في الفصل التالي.

وقد انطوت طريقة هاملتون أيضاً على عنصر جديد يتمثل في "المتغيرات" التي تستخدم في وصف المنظومة الفيزيائية. فحتى ذلك الحين كانت ***مواضع*** الجسيمات هي المتخذة كمتغيرات أولية، بينما لم تكن سرعاتها إلاّ معدلات تغير الموضع بالنسبة للزمن. إذ يذكر القارئ (ص 211) أن مانحتاج إليه لتحديد حالة منظومة نيوتنية وتعيين سلوكها فيما بعد هو أوضاع

جسيماتها كلها ومتجهات سرعها. أما في صياغة هاملتون، فعلينا أن نختار اندفاعات الجسيمات بدلاً من سرعاتها (وكنا أشرنا في ص209) إلى أن اندفاع الجسيم هو جداء كتلته في متجهة سرعته). وقد يبدو هذا التغيير بحد ذاته تافهاً، ولكن الشيء المهم هو أن وضع كل جسيم واندفاعه يعاملان كأنهما مقداران ***مستقلان*** وبمنزلة واحدة، تقريباً. وهكذا نتصرف في بادئ الأمر "كما لو أن" اندفاع كل جسيم لاعلاقة له بمعدل تغير المتحول الدال على موضعه، بمعنى أن الاندفاعات والأوضاع مجموعتان مستقلتان من المتحولات، حتى ليمكن أن نتخيل أن الاندفاع كان من الممكن أن يكون مستقلاً في تغيره عن الحركة في المكان. فلدينا إذن في صياغة هاملتون ***مجموعتان*** من المعادلات، تطلعنا إحداهما على كيفية تغير ***اندفاعات*** شتى الجسيمات مع الزمن، وتطلعنا الثانية على كيفية تغير ***مواضعها*** مع الزمن. وتتعين معدلات التغير في كل حالة بمختلف المواضع والاندفاعات في تلك اللحظة.

أو بطريقة مبسطة جداً: تعبر مجموعة معادلات هاملتون الأولى عن قانون نيوتن الثاني (معدل تغير الاندفاع = القوة) في حين تطلعنا المجموعة الثانية على ماهي الاندفاعات بدلالة متجهات السرعة (بالفعل، إن: معدل تغير الموضع = الإندفاع ÷ الكتلة). وهنا نذكر أن قوانين غاليليه - نيوتن للحركة، كان يُعبَّر عنها بدلالة التسارعات، أي معدلات تغير معدلات تغير المواضع (أي معادلات "من المرتبة الثانية"). أمّا في معادلات هاملتون، فلاتدخل سوى معدلات تغير المقادير نفسها بدلاً من معدلات تغير معدلات التغير (أي لدينا معادلات من "المرتبة الأولى"). وتشتق هذه المعادلات كلها من كمية مهمة واحدة هي ***دالة هاملتون*** H التي تعبر عن ***طاقة المنظومة الكلية*** بدلالة المتحولات التي هي المواضع والاندفاعات.

والحقيقة أن صيغة هاملتون هذه تقدم لنا وصفاً رشيقاً جداً ومتناظراً للميكانيك. وسوف نذكر هذه المعادلات لالشيء إلاّ لنرى كيف تبدو فقط، وإن يكن هناك كثير من القراء لم يتآلفوا مع رموز حساب التفاضل والتكامل الضرورية لفهم المعادلات فهماً كاملاً - وهذا مالن نحتاج إليه هنا. إن كل ماينبغي معرفته، بالنسبة لحساب التفاضل والتكامل، هو أن "النقطة" الظاهرة في الطرف الأيسر من كل معادلة (وهي فوق الحرف) تشير ***إلى معدل التغير بالنسبة للزمن*** (للاندفاع في الحالة الأولى، وللموضع في الثانية):

$$\dot{P_i} = - \delta H / \delta x_i \qquad \dot{x_i} = \delta H / \delta P_i$$

أما الحرف الصغير i فيستخدم هنا للتمييز بين مختلف إحداثيات الاندفاع $p_1, p_2, p_3, p_4, \ldots$ ومختلف إحداثيات المواضع $x_1, x_2, x_3, x_4, \ldots$. وسيكون لدينا في حال وجود n جسيماً طليقاً (حراً)، 3n إحداثي اندفاع و 3n إحداثي موضع (لكل جسيم إحداثي على كل منحى من المناحي الثلاثة المستقلة في المكان). ويشير الرمز δ إلى "التفاضل الجزئي" (أي أخذ المشتقات بالنسبة لمتحول مع إبقاء المتحولات الأخرى ثابتة)، أما H فهي الدالة الهاملتونية التي سبق ذكرها. (وإذا لم يكن القارئ مطلعاً على مفهوم "التفاضل" فلا يشغلن باله. بل كل

مايطلب منه هو أن يعرف أن الطرف الأيمن في كل من هـاتين المعـادلتين هـو تعبـير ريـاضي لـه معنى رياضي محدد تماماً ومكتوب بدلالة المتحولات x_i و p_i).

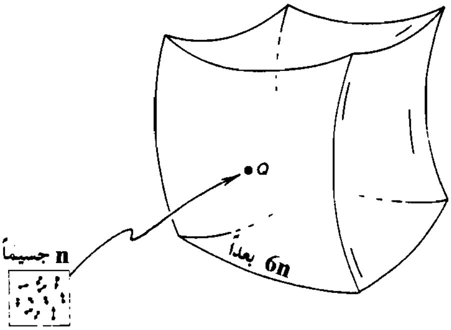
إن الإحداثيات ... x_1, x_2, و ... p_1, p_2, ليست بالضرورة إحداثيات ديكارتية للجسـيمات (أي تكون فيها x_i مسافات عادية تقاس على مناحٍ مختلفـة متعـامدة مثنـى مثنـى) بـل يمكـن أن تكون أشياء اخـرى أكثر عمومية. كـأن يكـون بعـض هـذه الإحداثيـات (x_i) ***زوايا*** مثـلاً (وعندئـذٍ تكون الـ p_i هي الاندفاعـات ***الزاوية*** الموافقـة بدلاً من الاندفاعـات (أنظر ص209). أو يمكن أن تكـون أي قياســات أخـرى عامـة جـداً. والطريـف الملفـت للنظـر أن معـادلات هاملتون تبقى محافظة عندئذٍ على شكلها نفسه. بالفعل، إن اختيار H بالصـورة المناسـبة، يُبقـي معادلات هاملتـون صحيحة لأجل أي منظومـة من المعادلات الكلاسـيكية أيـاً كـانت، وليـس لأجـل معادلات نيوتن فحسب. وهذا ماتبع بوجه خاص في حال نظريـة مكسـويل (ـ لورنتز) التي سـنتحدث عنها قريباً. كما تظل معادلات هاملتون صحيحة في حال النسـبية الخاصـة، بـل وحتى النسبية العامة، فهي أيضـاً يمكن أن تكتــب في هيكـل هـاملتوني بشــرط الالتــزام قليـلاً بجانب الحـذر. بل سـنرى فيما بعد أيضــاً عنـد دراســة معادلــة شـرودنغر (ص 342) أن هـذا الهيكل الهاملتوني هو الذي كان نقطة الانطلاق إلى معادلات ميكانيك الكـم. ففـي بقـاء هـذه الصيغة موحدة في بنية المعادلات الديناميكية على الرغم من جميع التغيرات الثورية التي تعرضـت لها النظريات الفيزيائية طيلة القرن الماضي تقريباً أمر يلفت النظر حقاً.

فضاء الطور

لقد أصبح بإمكاننا، باستخدام معادلات هاملتون، أن "نتصور" تطور المنظومة الكلاسـيكية تصوراً معبراً جداً وعامـاً. بـالفعل، لنحـاول أن نتخيـل "فضـاء لـه عـدد كبـير مـن الأبعـاد، أو بـالتحديد: بعـداً واحـداً لكـلٍ مـن الإحداثيـات ... $x_1, x_2, ..., p_1, p_2,$ (وهـذا مـألوف في الرياضيات التي غالباً مايكون عدد أبعاد فضاءاتها أكبر من ثلاثة). ويدعى هذا الفضـاء، ***فضـاء الطور*** ***Phase Space*** (أنظر الشكل 5-10). ففي حالة وجـود **n** جسـيماً غـير مقيـد، يكـون عدد أبعاد فضاء الطور 6n (ثلاثة إحداثيات لموضع كـل جسـيم وثلاثـة إحداثيـات لاندفاعـه). وقد يدهش القارئ من أن عدد الأبعاد حتى في حالة ***الجسيم الواحد*** هو ضعفـا مـا ألفـه عـادة "لتصور" جسيم واحد، فيالها من طريقة "لتبسيط" الأمور! ولكن لاتدعوا هذا يحبطكم. إذ على الرغم من أن هذه الأبعاد الستة (للجسيم الواحد) هي نفسـها أكـثر مما نحـن مهيؤون لتصـوره (بسهولة!). إلاّ أننا حتى لو كنا نستطيع رسمه، فلن يكون هذا ذا فائدة كبيرة، لأن عـدد أبعـاد فضاء الطور لجزيئات الهواء الذي يملأ غرفة فحسب هو شيء من قبيل:

$$10\ 000\ 000\ 000\ 000\ 000\ 000\ 000\ 000\ 000 = 10^{28}$$

لذلك لاأمل لنا في محاولة تصور فضاء ***بهذه*** الضخامة بدقة. ثم إن البراعة ليست أيضاً في محاولة ذلك - حتى في حالة فضاء الطور لجسيم واحد. وكل ماهو مطلوب من القارئ هو تصور صورة مبهمة لمنطقة ثلاثية الأبعاد (أو حتى ذات بعدين فقط) إن "الفضاء" الممثل في الشكل 5-10 يؤدي الغرض تماماً.



الشكل 5-10: صورة لفضاء الطور: تمثل نقطة واحدة Q من فضاء الطور حالة المنظومة الفيزيائية بأكملها. بما في ذلك حركة أجزائها الآنية.

والآن كيف يمكن أن نتصور معادلات هاملتون في فضاء الطور؟ يجب أولاً أن نفهم جيداً ماالذي تمثله ***نقطة واحدة*** Q في فضاء الطور، إنها تمثل في الحقيقة حالة المنظومة في لحظة معينة، لأن إحداثياتها هي جميع إحداثيات الموضع ... $x_1, x_2,$ وجميع إحداثيات الاندفاع ... $p_1, p_2,$ لمختلف الذرات. وهذا يعني أن Q تمثل ***المنظومة الفيزيائية بأكملها*** وهي في حالة حركية معينة تحددها الحالة الحركية الخاصة بكل جسيم من جسيماتها المكوّنة لها. وتعطينا معادلات هاملتون معدلات تغير جميع هذه الإحداثيات فيما لو عرفنا قيمها الحاضرة (أو الابتدائية)، أي أن معادلات هاملتون تحدد كيف ستتحرك جميع الجسيمات الفردية. وهذا مايترجم في لغة فضاء الطور، بأن معادلات هاملتون تعرِّفنا على الطريقة التي يجب أن تتحرك فيها نقطة Q بمفردها في هذا الفضاء إذا ماعرفنا موضعها الحاضر فيه. فلدينا في كل نقطة من فضاء الطور سهم صغير - أو الأصح ***متجهة*** - يعرفنا بالطريقة التي يجب أن تتحرك فيها النقطة Q لكي تصف تطور منظومتنا بأكملها مع مرور الزمن. ويؤلف مجموع الأسهم بكامله مايدعى حقلاً متجهياً (أو حقل متجهات) (الشكل 5-11). لذلك تعرِّف معادلات هاملتون حقلاً ***متجهياً*** في فضاء الطور.

والآن لنتساءل ترى كيف تُؤَوَّل ***الحتمية*** الفيزيائية في لغة فضاء الطور؟ يجب أن يكون لدينا أولاً مجموعة من القيم المحددة التي هي إحداثيات جميع المواضع والاندفاعات في لحظة ابتدائية $t = 0$. وهذا يعني أن لدينا نقطة معينة تماماً Q في فضاء الطور. ولإيجاد تطور المنظومة مع الزمن نتبع الأسهم. وهكذا أصبح تطور منظومتنا بأكملها مع الزمن بغض النظر عن درجة تعقيدها،

يوصف في فضاء الطور بحركة نقطة واحدة فحسب، وهذه النقطة تتحرك متبعة الأسهم التي تلاقيها في كل نقطة تمر بها. ونستطيع أن نتصور بأن هذه الأسهم تشير إلى "متجهة السرعة" التي تتحرك بها Q في كل نقطة من فضاء الطور. فإذا كان السهم "طويلاً" تتابع النقطة Q طريقها بسرعة، أما إذا كان السهم "قصيراً" تكون حركة النقطة Q بطيئة. ولكي نرى كيف تتصرف منظومتنا في لحظة t ، يكفي أن ننظر إلى أين تحركت Q في تلك اللحظة، وذلك باتباع الأسهم في هذا الطريق، وهذا طبعاً تصرف حتمي، لأن طريقة تحرك Q تتعين كلياً بحقل هاملتون المتجهي.

ولكن ماذا بشأن الحسوبية؟ أو إذا بدأنا من نقطة حسوبة في فضاء الطور (أعني من نقطة جميع إحداثيات موضعها واندفاعها أعداد حسوبة، راجع الفصل الثالث ص 115) وانتظرنا حتى زمن حسوب t ، فهل ننتهي بالضرورة عند نقطة يمكن الحصول عليها بطريقة حسوبة من t ومن قيم الإحداثيات في نقطة البدء؟ إن الجواب عن ذلك يتوقف بالطبع على اختيار الدالة الهاملتونية H، إذ توجد في الواقع ***ثوابت فيزيائية*** تظهر في H، مثل ثابت الثقالة النيوتني وسرعة الضوء – وتتوقف القيم المضبوطة لهذه الثوابت على اختيار الواحدات، أما الثوابت الأخرى فيمكن أن تكون مجرد أعداد – وإذا كان علينا أن نأمل بالحصول على إجابة إيجابية، فعندئذٍ علينا التأكد أولاً من أن هذه الثوابت هي ***أعداد حسوبة*** (وإلاّ لما كان هناك أدنى أمل في أن تكون النقطة التي تنتهي إليها حسوبة). فإذا فرضنا فعلاً أن هذه هي حالنا، عندئذٍ أقدر أن الجواب سيكون فعلاً بالايجاب في حال الهاملتونيات المألوفة التي نصادفها عادة في الفيزياء. ولكن ***ليس هذا سوى*** تقدير. وهذه على كل حال مسألة مهمة آمل أن تنال دراسة أكثر تفصيلاً في المستقبل.

ويبدو لي من جهة ثانية، ولأسباب شبيهة بتلك التي أثرتها بإيجاز عند الحديث عن عالم كرات البليار، أن ليست هذه بالتحديد القضية ذات الشأن. بل لابد لنا قبل كل شيء أن نتطلب دقة لا نهائية في إحداثيات نقطة من فضاء الطور – أعني معرفة ***جميع*** الأرقام العشرية فيها – لكي يكون هناك معنى لقولنا إن هذه النقطة من فضاء الطور هي غير حسوبة. (إن العدد الذي يكتب بعدد منته من الأرقام العشرية هو دائماً عدد حسوب). ومعرفة جزء منته من المنشور العشري لعدد ما، لايمكن أن يعطينا فكرة عن حسوبية المنشور الكامل لهذا العدد. ولكن جميع القياسات الفيزيائية لها حد معلوم من الدقة لايمكن أن تتجاوزه، فهي لذلك لايمكن أن نعرف منها سوى عدد محدود من الأرقام العشرية، فهل ينفي ذلك مفهوم "العدد الحسوب" كلياً بمجرد أن نطبقه في القياسات الفيزيائية؟

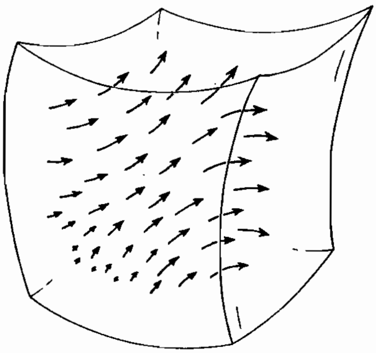
في الحقيقة، إن الآلة [آلة حاسبة مثلاً] التي يمكن أن تنال بأية طريقة مفيدة ميزة من وجود عنصر (افتراضي) غير حسوب في قوانين الطبيعة، لاحاجة بها لأن تعوّل، كما هو مرجح فيها، على قياسات تتم بدقة غير محدودة. ولكن من الجائز أني أنا أيضاً أتخذ هنا مسلكاً متزمتاً.

بالفعل، لنفرض أن لدينا آلة فيزيائية يمكنها، لأسباب نظرية محددة معروفة، أن تحاكي بعض العمليات الرياضية اللاخوارزمية الهامة. فإذا أمكن لهذا السلوك أن يتحقق دائماً بدقة، عندئذ لابد لسلوك الآلة المضبوط أن يوفر الإجابات الصحيحة عن جملة من الأسئلة المتتالية المهمة في الرياضيات، التي إجاباتها ***نعم/لا*** والتي لايمكن أن ***توجد*** لها خوارزمية (كتلك التي رأيناها في الفصل الرابع). ولما كانت كل خوارزمية ستفشل بالتأكيد في مرحلة ما (في حل هذه المسائل) فالمفروض في هذه الآلة أن تعطينا في هذه المرحلة شيئاً جديداً لاتعطيه الخوارزمية. وهنا قد تلجأ الآلة في الحقيقة إلى الاستعانة بفحص وسيط فيزيائي معين بدقة أكبر فأكبر، بحيث أنها تبدي دقة متزايدة كلما كان عليها أن تجيب عن أسئلة أكثر فأكثر في قائمة الأسئلة. ومهما يكن من أمر لابد أن نحصل على شيء جديد من آلتنا عند مرحلة معينة من الدقة، أو على الأقل، طالما أننا لم نجد خوارزمية محسنة تجيب عن الأسئلة التالية. وبما أن الأمر كذلك، إذن علينا أن نمضي إلى قدر أكبر من الدقة لكي نكون قادرين على إنجاز شيء لايمكن لخوارزميتنا ***المحسَّنة*** أن تقدمه لنا.

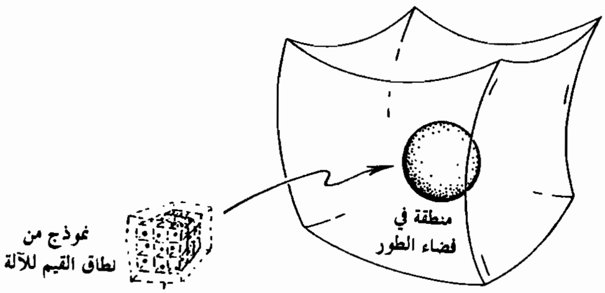
وعلى الرغم من ذلك، ستظل زيادة الدقة الدائمة في وسيط فيزيائي، تبدو طريقة مملة وغير مرضية عند ترميز المعلومات. وسيكون من الأفضل أن نتلقى المعلومات في صورة ***متقطعة*** (أو "رقمية"). وعندئذ يمكن إنجاز الإجابات عن عدد متزايد من الأسئلة المدرجة في لائحة معينة، إما بفحص عدد متزايد من الواحدات المتقطعة أو ربما بفحص مجموعة ***محددة*** من هذه الوحدات المتقطعة مرة بعد أخرى. وعندئذ تصبح المعلومات غير المحدودة التي نود الحصول عليها، موزعة على فترات متزايدة الطول. (يمكن أن نتخيل أن هذه الوحدات المتقطعة تتكون من أجزاء، يمكن أن يكون كل منها في حالة "عمل" أو "توقف" مثل الـ "0" والـ "1" التي رأيناها في وصف آلة تورنغ في الفصل الثاني). لذلك، نحن بحاجة، كما يبدو، لآلات من نوع معين، يمكنها أن تكون أولاً في واحدة من حالتين منقطعتين (متمايزتين)، وأن تصبح ثانياً في إحدى هاتين الحالتين (المتمايزتين) بعد أن تكون قد تطورت وفقاً للقوانين الديناميكية. فلو كان هذا هو الوضع لأمكننا أن نتجنب ضرورة فحص كل آلة إلى درجة عالية من الدقة بقدر مانريد.

والآن، هل تتصرف المنظومات الهاملتونية فعلاً بهذه الطريقة؟ إنها ستتصرف فعلاً كذلك إذا وجد نوع من الاستقرار في سلوكها، فعندئذ يكون التحقق من أن آلتنا موجودة في هذه الحالة أو في تلك هو مسألة واضحة محددة. فيجب أولاً، إذا ماوجدت الآلة في إحدى هذه الحالات، أن تظل فيها (لفترة معقولة من الزمن على الأقل)، لا أن تنحرف عنها إلى أخرى غيرها. ويجب ثانياً، إذا لم توجد الآلة في واحدة من هذه الحالات بالضبط، ألا يستفحل الخلل: ي يجب أن يتناقص هذا الخلل ***حتى يزول نهائياً*** مع مرور الزمن. ويجب أخيراً أن تكون آلتنا لمقترحة مكونة من جسيمات (أو من أجزاء من الواحدات) ينبغي وصفها بدلالة وسيطات

مستمرة. فكل حالة متقطعة متميزة يجب أن تغطي "مجـالاً" مـا لهـذه الوسـيطات المسـتمرة. (إن إحدى الطرق، مثلاً، لتصور الخيارات المتقطعة، هي أن نتخيل جسيماً يمكنه أن يوجـد في هـذه العلبة أو في تلك، وحين نريد أن نعـبر عـن أن الجسـيم موجـود فعـلاً في إحـدى هـذه العلـب، ماعلينا إلا أن نقول: إن إحداثيات موضع هذا الجسيم واقعة في نطاق معين). ومعنـى ذلـك، في لغة فضاء الطور، أن تقابل كلَّ خيار من خياراتنا المتقطعة ***منطقة*** من فضاء الطور تكون مختلـف نقاطها موافقة لهذا/***الخيار نفسه*** من خيارات آلتنا (الشكل 5-12).



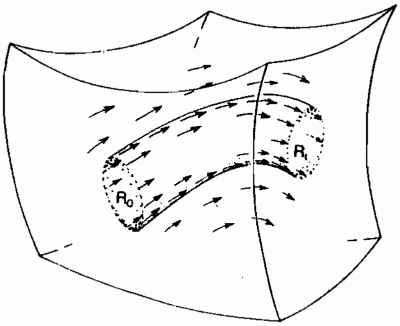
الشكل 5-11: حقل متجهي على فضاء الطور يمثل التطور الزمني تبعاً لمعادلات هاملتون.



الشكل 5-12: منطقـة من فضاء الطور توافق نطاقـاً معينـاً للقيـم التي يمكن أن تأخذهـا قيم محتملة للمواضع والاندفاعات جميع الجسيمات. ويمكن لهذه المنطقة أن تمثل حالة متميزة (أعني تمثل أحد الخيارات) لآلة ما.

لنفرض الآن أن الآلة انطلقت عندمـا كـانت النقطـة الـتي تمثلهـا في فضـاء الطـور واقعـة في المنطقة R_0 الموافقة لأحد تلك الخيارات الممكنة التي سبق ذكرها. وعندئذ يمكن تمثيل التطور مع الزمن بانسحاب المنطقة R_0 على امتداد حقل المتجهات الهـاملتوني فبعـد انقضـاء زمـن قـدره t تتحول المنطقة R_0 إلى منطقة R_t. إننا نتخيل في أثناء تصورنا ذلك أن منظومتنا قد تطورت مـع الزمن بدءاً من ***جميع*** الحالات الابتدائية الموافقة للخيار نفسه كلها دفعـة واحـدة (وكأنهـا حالـة واحدة) (أنظر الشكل 5-13). أما مشكلة/***الاستقرار*** (بمعناها الذي يعنينا هنا) فهي: هل سـتظل

المنطقة R_t متموضعة [في مكانها] مع تزايد الزمن t أم أنها تسعى للتوسع في فضاء الطور كله؟ فإذا ظلت المناطق من النوع R_t متموضعة [في مكانها] مع تقدم الزمن، يكون استقرار منظومتنا عندئذٍ قابلاً للقياس، وستظل نقاط فضاء الطور التي بعضهما قريب من بعض (وهذا مايقابل حالات فيزيائية مفصلة للمنظومة، إحداها شديدة الشبه بالأخرى) متقاربة معاً في فضاء الطور. ولن يتضخم عدم الدقة في تعيينها مع الزمن. ولكن كل توسع للمناطق من النوع R_t مبالغ فيه سيؤدي إلى عدم القدرة على التنبؤ بسلوك المنظومة.

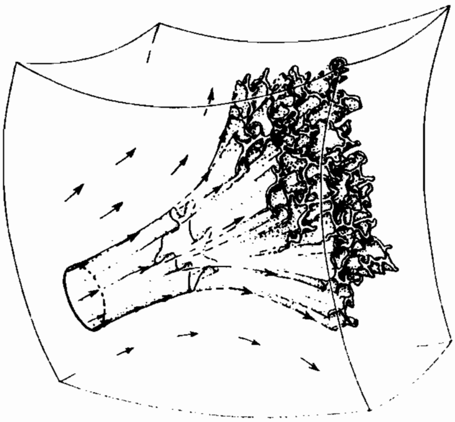


الشكل 5-13: تنسحب المنطقة R_0 من فضاء الطور مع تقدم الزمن على امتداد حقل المتجهات إلى أن تتحول إلى منطقة جديدة R_t، الأمر الذي يمكن أن يمثل تطور أحد خيارات آلتنا زمنياً.

ترى ماالذي نستطيع قوله عن المنظومات الهاملتونية بوجه عام؟ وهل تنحو المناطق في فضاء الطور إلى الانتشار والتوسع أم لا؟ قد يبدو أن مايمكن أن يقال عن مسائل من هذا النوع العام هو قليل جداً. وعلى رغم ذلك، فقد تبين أن هناك نظرية بديعة جداً تنسب إلى الرياضي الفرنسي البارز ليوفيل **Joseph Liouville (1802 - 1892)** مفادها أن أي منطقة من فضاء الطور يجب أن يظل ***حجمها*** ثابتاً عند أي تطور هاملتوني (والذي يقصده بالحجم هنا هو طبعاً الحجم بمعناه الخاص بفضاء كثير الأبعاد كفضاء الطور). لذلك يجب أن يكون حجم كل منطقة R_t ***مساوياً*** لحجم R_0. ومن هذه النتيجة، يبدو أن نظرية ليوفيل تجيب بالإيجاب عن مسألة الاستقرار التي عرضناها منذ قليل، لأن **حجم** منطقتنا - بمعنى الحجم الخاص بفضاء الطور الكثير الأبعاد - لايمكن أن يكبر. وهذا يجعلنا نعتقد أن المنطقة نفسها لايمكن أن تتوسع في فضاء الطور.

ولكن هذا القول مضلل، وسنرى بعد التفكير أن الوضع على الأغلب هو عكس ذلك تماماً. وقد حاولت في الشكل 5-14 أن أشير إلى نوع السلوك الذي يمكن أن يتوقعه المرء بوجه عام. حيث يمكن أن نتصور أن المنطقة الابتدائية R_0 هي منطقة صغيرة لها شكل معين معقول أقرب

لأن يكون مدوراً من أن يكون متطاولاً – الأمر الذي يدل على أن الحالات التي تنتمي إلى هذه المنطقة، يمكن أن تعين بدقة معقولة. وعلى رغم ذلك تبدأ المنطقة R_t بالتشوه والتطاول مع مرور الزمن، فلربما أصبحت في البدء شيئاً شبيهاً بالأميبيا، ولكنها تتطاول بعدئذٍ كثيراً إلى مسافات كبيرة في فضاء الطور متلوية إلى الأمام وإلى الخلف بطريقة معقدة جداً، ويظل حجمها هو نفسه فعلاً، ولكنه على صغره ينتشر ***بسماكة رقيقة*** جداً على مناطق واسعة من فضاء الطور. والوضع الشبيه بذلك إلى حد ما، هو نقطة الحبر الصغيرة التي تسقط في وعاء مملوء بالماء. فعلى الرغم من أن حجم مادة الحبر يظل على حاله، إلا أنه يعم أرجاء الوعاء بأكمله بكثافة خفيفة جداً. إن شيئاً شبيهاً بذلك يحدث للمنطقة في فضاء الطور، فهي نفسها قد لاتنتشر في ***سائر أنحاء*** فضاء الطور (وهي الحالة الحدية التي تُطلق عليها صفة "إرغودي" "ergodic")[†] ، وإنما يرجح أن تنتشر R_t في منطقة أوسع بكثير جداً مما بدأت به (ويمكن لمن يريد دراسة أوسع مراجعة Davies 1974).



الشكل 5-14: على الرغم من الحقيقة التي تنص عليها نظرية ليوفيل، وهي أن حجم فضاء الطور لايتغير مع تطور الزمن، فإن هذا الحجم سينتشر في الحقيقة ليشغل جزءاً من فضاء الطور أكبر من الأول بسبب تعقيد هذا التطور الهائل.

إن المشكلة هي أن انحفاظ الحجم لايقتضي إطلاقاً انحفاظ ***الشكل***، لأن المناطق الصغيرة تسعى نحو التشوه إلى أن يتعاظم هذا التشوه على المسافات الكبيرة. ثم إن هذه المشكلة تتفاقم حديتها كلما ازداد عدد أبعاد الفضاء بسبب تزايد عدد "الاتجاهات" عندئذ التي يمكن للمنطقة أن تنتشر فيها موضعياً. والحقيقة أن نظرية ليوفيل، بإبقائها المنطقة R_t تحت ضابط معين

[†] إرغودي نسبة إلى "الفرضية الإرغودية" في الفيزياء الإحصائية وهي تتعلق بإمكان الاستعاضة عن المتوسطات الزمنية للتوابع الطورية بالمتوسطات الطورية.

(من دون أن تكون "علاجاً" للمشكلة) تجعلنا نواجه مسألة أساسية! فقد كان من الجائز أن يتصور المرء من دونها أن سعي المنطقة الذي لاشك فيه لأن تتوسع في فضاء الطور، كان يمكن في ظروف مناسبة أن يوازنه انكماش في الحجم العام. ولكن النظرية تخبرنا أن هذا الأمر *مستحيل*، وأن علينا أن نواجه هذه الورطة المذهلة (أي التوسع)، التي هي في الحقيقة سمة عامة في جميع المنظومات الديناميكية (الهاملتونية) الكلاسيكية التي من النمط العادي(9)

وهنا يمكن أن نتساءل، كيف يمكن في ضوء هذا التوسع في فضاء الطور أن نتوصل إلى أي تنبؤ كان في الميكانيك الكلاسيكي؟ إنه سؤال مهم فعلاً، فما نخلص إليه من هذا التوسع هو أن لاأهمية لأن نعرف مدى الدقة في حالة المنظومة الابتدائية. (وهذا طبعاً ضمن حدود معقولة). لأن ريبنا ستسير نحو التضخم مع الزمن لدرجة تصبح معها معلوماتنا الابتدائية غير مفيدة تقريباً. فالميكانيك الكلاسيكي إذن، هو بهذا المعنى، *غير مفيد للتنبؤ* في أساسه (ولنذكر هنا مفهوم "الشواش" الذي رأيناه سابقاً).

فكيف كنا ننظر، إذن، إلى ديناميك نيوتن بأنه ناجح جداً؟ إن الأسباب الداعية إلى ذلك في حالة الميكانيك السماوي (أعني حركة الأجرام السماوية تحت تأثير الثقالة)، هي، أولاً: *يبدو* أن الأجسام المعنية في هذه الحالة هي أجسام متماسكة (أو صلبة تقريباً) وعددها صغير نسبياً (الشمس، الكواكب، القمر)، إضافة إلى كون كتلها متفاوتة تفاوتاً كبيراً – لذلك يمكن أن نتجاهل، بتقريب أولي، تأثيرات الاضطراب التي تسببها الأجسام الأقل كتلة، وأن نعامل الكبيرة منها وكأنها أجسام *قليلة* تتحرك بتأثير أحدها في الآخر – والسبب *الثاني*، أن قوانين الديناميك السارية على الجسيمات الفردية المكونة لهذه الأجسام، يمكن أن ينظر إليها بأنها تقوم بعملها على مستوي الأجسام نفسها – حتى ليمكن أن تعامل هذه الأجسام نفسها (الشمس، الكواكب، القمر)، وبتقريب جيد جداً، معاملة الجسيمات، من دون أن نأبه لجميع الحركات التفصيلية الصغيرة التي تقوم بها الجسيمات التي تتكون منها فعلاً هذه الأجسام السماوية(10). وهكذا نتخلص من ورطتنا عند النظر في أجسام "قليلة" فقط ويصبح التوسع في فضاء الطور غير مهم.

ولكن، إذا تركنا جانباً الميكانيك السماوي وسلوك القذائف (التي هي في حقيقتها حالة خاصة لاغير من الميكانيك السماوي)، أو تخلينا بوجه عام عن دراسة المنظومات البسيطة التي لايشترك فيها سوى عدد صغير من الجسيمات، عندئذ لن تبدو الطرق التي يستعملها الميكانيك النيوتني إطلاقاً بمثل هذه القدرة على "التنبؤ المحتم" المفصل. والأحرى، بصورة عامة، أن نستخدم مشروع نيوتن العام لصنع نماذج نستطيع أن نستدل منها على خواص شاملة للسلوك. فنستفيد عندئذ من بعض نتائج قوانين الديناميك، مثل انحفاظ الطاقة والاندفاع والاندفاع الزاوي، التي تبقى صحيحة بالفعل في كل المستويات. وعدا عن ذلك فإن بالإمكان مزج خواص إحصائية بقوانين الديناميك التي تتحكم بالجسيمات الافرادية واستخدامها للوصول إلى

تنبؤات تتعلق بالسلوك العام. (أنظر مناقشة الترموديناميك في الفصل السابع. حيث سنجد أن لمفعول التوسع في فضاء الطور الذي سبق أن ناقشناه، صلة وثيقة بقانون الترموديناميك الثاني، وأن بالإمكان، مع بذل العناية اللازمة، استخدام هذه الأفكار بأسلوب تنبؤي ذكي). وقد كان حساب نيوتن الرائع لسرعة الصوت في الهواء (الذي أجرى عليه لابلاس بعد قرن أو يزيد تصحيحاً دقيقاً) مثالاً جيداً على ذلك. ومهما يكن من أمر، فإن الحالات التي تستخدم فيها الحتمية، التي هي مرتبطة بالديناميك النيوتني (أو الهاملتوني بوجه عام) نادرة جداً.

وهناك أيضاً نتيجة أخرى مهمة تترتب على التوسع في فضاء الطور، فهو يشير بالفعل إلى ***أن الميكانيك الكلاسيكي لايمكن أن يكون حقيقة هو ميكانيك عالمنا***، وهذا قول أبالغ فيه فعلاً بعض الشيء، ولكن ليس كثيراً. فالميكانيك الكلاسيكي، يمكن أن يفسر سلوك الأجسام المائعة، ولاسيما الغازات، كما يفسر سلوك السوائل أيضاً إلى حد بعيد، حيث ينصب الاهتمام على الخواص "الوسطية" الشاملة في منظومة الجسيمات. ولكنه يعاني المصاعب عند تفسير بنية الأجسام الصلبة، حيث يحتاج الأمر إلى بنية منظمة تنظيماً مفصلاً. فالصعوبة الأساسية هي في تفسير كيف يمكن للجسم الصلب أن يحافظ على شكله، في حين أنه مكوَّن من عدد كبير جداً من الجسيمات النقطية، التي يتناقص ترتيبها المنظم باستمرار بسبب التوسع في فضاء الطور. ولذلك دعت الحاجة، كما نعرف الآن، إلى ميكانيك الكم لتفسير بنية الأجسام الصلبة الفعلية تفسيراً صحيحاً وقد تبين أن المفعولات الكمومية يمكن أن تمنع، بطريقة أو بأخرى، حدوث هذا التوسع. وهذه نتيجة مهمة سنعود إليها فيما بعد (أنظر الفصلين الثامن والتاسع).

كما أن هذه النتيجة هي موضوع ذو صلة وثيقة بمشكلة بناء آلة حاسبة. لأن التوسع في فضاء الطور هو مسألة تحتاج إلى ضابط يضبطها. فإذا كانت لدينا منطقة من فضاء الطور مقابلة لحالة "منفصلة" من حالات آلة حاسبة (كما هو الحال في المنطقة R_0 التي ورد وصفها سابقاً)، فلا يجوز لهذه المنطقة أن تتوسع توسعاً غير ضروري. وهنا نذكر أن حاسوب كرات البليار نفسه، المنسوب إلى فردكن وتوفولي، كان بحاجة إلى ***جدران صلبة*** لكي يقوم بعمله. ثم إن "الصلابة" نفسها في أي جسم مكون من جسيمات عديدة هي شيء يحتاج فعلاً إلى ميكانيك الكم، بل وحتى أي "آلة حاسبة كلاسيكية" لابد لها كما يبدو، لكي تعمل بالفعل، من الاستعانة بمفعولات كمومية.

نظرية مكسويل الكهرطيسية

إن مايتبادر إلى ذهننا في الصورة النيوتنية للعالم، هو جسيمات ضئيلة يؤثر كل منها في الآخر بقوى تعمل عملها عن بعد، ويمكنها إن لم تكن نقاطاً بكل معنى الكلمة، أن ترتد إحداها عن الأخرى عند حدوث تلامس فيزيائي حقيقي بينها. وكان وجود القوتين الكهربائية والمغنطيسية معروفاً منذ القديم (كما سبق أن ذكرت سابقاً ص 211). ودرسهما مع شيء

من التفصيل وليم جلبرت في عام 1600 وبنيامين فرانكلين Benjamin Franklin في عام 1752. والقوتان تعملان بطريقة شبيهة بقوى الثقالة، بمعنى أنهما تتناقصان مع مربع مقلوب المسافة، وإن كان بالتدافع بدلاً من التجاذب - ***فالمثيل هنا يدفع مثيله ولايجذبه*** - كما تعين الشحنة الكهربائية (وشدة القطب المغنطيسي) شدة هاتين القوتين بدلاً من الكتلة. وهكذا نرى أنه لاوجود لصعوبة حتى الآن في انضواء القوتين الكهربائية والمغنطيسية في مخطط نيوتن. كما يمكن كذلك تنسيق سلوك الضوء إلى حد ما مع المخطط النيوتني (وإن كان مع بعض الصعوبات الواضحة)، وذلك إما باعتبار الضوء مكوناً من جسيمات إفرادية (يجب أن ندعوها الآن "فوتونات")، أو باعتبار الضوء حركة تموجية في وسط من نوع ما (هو الأثير) نتصوره مكوناً هو نفسه من جسيمات.

كما يسبب تولد القوى المغنطيسية عند حركة الشحنات الكهربائية صعوبة إضافية بالنسبة للمشروع النيوتني، ولكن من دون أن يخل بالمشروع ككل. وكان قد اقترح كثير من الرياضيين والفيزيائيين (بمن فيهم غَوْص) Gauss منظومات من المعادلات بدا لهم أنها تصف آثار حركة الشحنات الكهربائية ضمن إطار الهيكل النيوتني العام. ولكن يبدو أن أول عالم تحدى جدياً الصورة النيوتنية هو المجرب والنظري الانجليزي العظيم فَرَادي Michael Faraday (1791-1867).

فإذا أردنا أن نفهم طبيعة هذا التحدي، علينا أولاً أن نتفهم معنى ***الحقل*** الفيزيائي. لذلك دعونا ننظر أولاً في الحقل المغنطيسي. فمعظم القراء شاهدوا في حياتهم كيف تتصرف برادة الحديد الموضوعة على ورقة موجودة فوق مغنطيس، وكيف تتراصف هذه البرادة بطريقة مدهشة على امتداد خطوط تدعى "خطوط القوة المغنطيسية" إن هذه الخطوط التي نتصور أنها تظل موجودة حتى عند عدم وجود برادة الحديد، هي التي تكوّن مانسميه، ***الحقل المغنطيسي***. إن الحقل المغنطيسي، في كل نقطة من الفضاء، موجَّه في اتجاه معين هو اتجاه خط القوة المار بهذه النقطة. والحقيقة أن لدينا في كل نقطة متجهةً. فالحقل المغنطيسي يعطينا إذن مثالاً عن الحقل المتجهي. (ونستطيع أن نقارن هذا الحقل بالحقل المتجهي الهاملتوني الذي سبق أن رأيناه في المقطع السابق، مع الفرق أن هذا الحقل هنا، هو في فضاء عادي، أما السابق فكان في فضاء طوري). وبالمثل فإن الجسم المشحون كهربائياً محاط بنوع آخر من الحقل هو الحقل الكهربائي، وكذلك كل جسم ذي كتلة محاط ***بحقل ثقالي***. وهذان الحقلان الأخيران هما أيضاً حقلان متجهيان في الفضاء.

لقد كانت هذه الأفكار معروفة قبل فَرادي بزمن طويل، وكانت قد أصبحت جزءاً من عتاد النظريين في الميكانيك النيوتني. ولكن الفكرة السائدة عنها لم تكن ترى أن هذه الحقول نفسها هي مادة فيزيائية حقيقية، بل كان التصور السائد هو أنها أشبه "بالسجل" الضروري الذي يبين مقدار القوة التي كان يمكن أن تؤثر في جسيم ما فيما لو وضع هذا الجسيم في هذه

النقطة أو تلك. إلاّ أن مكتشفات فَرادي التجريبية العميقة (كالوشائع المتحركة، والمغانط وماشابه ذلك) أدت به إلى الاعتقاد بأن الحقلين الكهربائي والمغنطيسي هما "شيئان" فيزيائيان ***حقيقيان***، وأنه يمكن علاوة على ذلك، لهذين الحقلين عند تغيرهما أن "يستحث" أحدهما الآخر أحياناً عبر الفضاء، حتى ولو كان فارغاً، مولدين بذلك موجة لامادية! كما خمّن (فَرادي) أن الضوء نفسه يمكن أن يتكون من هذه الأمواج. وكانت وجهة نظر كهذه مخالفة "للحكمة النيوتنية" السائدة في ذلك الحين التي لم يكن بموجبها من الممكن تصور الحقول على أنها "حقيقية" بأي معنى كان، وأنها ليست أكثر من وسائل رياضية مناسبة ملحقة بالصورة النيوتنية "الصحيحة" "للحقيقة الفعلية"، وهي صورة الجسيمات النقطية التي يؤثر بعضها في بعض عن بعد.

ولكن مكتشفات فَرادي التجريبية، ومعها مكتشفات آخرين قبلها، ولاسيما مكتشفات الفيزيائي الفرنسي اللامع أمبير **André Marie Ampère** (1775-1836)، راحت تتحدى الفيزيائي الرياضي الاسكتلندي العظيم مكسويل **James Clerk Maxwell** (1831-1879) المشبع برؤية فرادي. فوقف حائراً بشأن الصيغة الرياضية لمعادلات هذين الحقلين الكهربائي والمغنطيسي التي انبثقت من هذه المكتشفات، واقترح بإلهام مفاجئ فذ إجراء تغيير في المعادلات قد يبدو بسيطاً، ولكنه أساسي في مضامينه. ولم يكن هذا التغيير إطلاقاً بوحي من الوقائع التجريبية المعروفة (على الرغم من أنه كان متسقاً معها)، وإنما كان نتيجة لمتطلبات مكسويل الخاصة، التي منها متطلبات فيزيائية ومنها رياضية ومنها جمالية أيضاً. وكان أحد مضامين معادلات مكسويل أن الحقلين الكهربائي والمغنطيسي يحث أحدهما الآخر فعلاً على مدى الفضاء الفارغ. إذ إن الحقل المغنطيسي المهتز، ينشأ عنه حقل كهربائي مهتز (وكان هذا من مضامين مكتشفات فَرادي التجريبية)، كما أن الحقل الكهربائي المهتز، ينشأ عنه بالمقابل حقل مغنطيسي مهتز (بالاستدلال من معادلات مكسويل)، ثم يولد هذا ثانية حقلاً كهربائياً وهكذا دواليك. (أنظر الشكلين 6-26 و 6-27 لرؤية الصور المفصلة لبنية هذه الأمواج). وكان باستطاعة مكسويل أن يحسب السرعة التي يجب أن ينتشر بها هذا المفعول في الفضاء – وقد وجد أنها هي سرعة الضوء! كما وجد علاوة على ذلك أن هذه الأمواج التي سميت أمواجاً ***كهرطيسية*** يمكن أن تبدي خاصتي الضوء، وهما التداخل والاستقطاب (المحيّر) اللتان كانتا معروفتين منذ زمن طويل (وسنعود إلى ذلك في الفصل السادس، ص 286 و323) ولم يقتصر الأمر على تفسير خواص الضوء المرئي الذي هو أمواج كهرطيسية ذات أطوال موجية خاصة (من 0,4 إلى 0,7 ميكرون)، بل تم كذلك التنبؤ بوجود أمواج كهرطيسية ذات أطوال أخرى يمكن أن تتولد مثلاً من التيارات الكهربائية في الأسلاك. وقد أثبت الفيزيائي الألماني اللامع هرتز Heinrich Hertz عام 1888 وجود هذه الأمواج تجريبياً. فوجد بذلك، لحلم فَرادي الملهم، قاعدة ثابتة في معادلات مكسويل الرائعة.

وعلى الرغم من أننا لن نحتاج هنا إلى تفاصيل معادلات مكسويل، إلا أنه لاضرر من إلقاء نظرة عليها، لاغير† :

$$1/c^2 \,.\, \delta\vec{\mathbf{E}}/\delta t = -\text{rot}\,\vec{\mathbf{B}} - 4\pi\,\vec{\mathbf{J}} \quad ; \quad \delta\vec{\mathbf{B}}/\delta t = -\,\text{rot}\,\vec{\mathbf{E}}$$

$$\text{div}\,\vec{\mathbf{E}} = 4\pi\rho \quad ; \quad \text{div}\,\vec{\mathbf{B}} = 0$$

حيث $\vec{\mathbf{E}}$ و $\vec{\mathbf{B}}$ و $\vec{\mathbf{J}}$ هي حقول متجهية تعبر عن الحقل الكهربائي والحقل المغنطيسي والتيار الكهربائي، على التوالي، وتعبر ρ عن كثافة الشحنة الكهربائية، أما c فهي مجرد ثابت (تتعلق بنسب الواحدات) وقد تبين أنه يساوي سرعة الضوء(11). ولاحاجة للقلق بخصوص التعبيرين "rot" و "div"†† ، فهما ليسا سوى تعبيرين عن نوعين خاصين مختلفين من التغيرات الفضائية. (إنهما تركيبان من عمليات الاشتقاق الجزئي التي تحسب بالنسبة للإحداثيات المكانية. ولنتذكر هنا عملية "الاشتقاق الجزئي" التي رمزها δ والتي رأيناها في معادلات هاملتون). وللمؤثرات $\delta/\delta t$ التي تظهر هنا أيضاً في الطرف الأيسر من المعادلتين العلويتين المعنى نفسه الذي كان للنقطة فوق الحرف التي استخدمت في معادلات هاملتون، والفرق بينهما يقتصر على التقنية فحسب. لذلك، تعني $\delta\vec{\mathbf{E}}/\delta t$ معدل تغير الحقل الكهربائي مع الزمن، وتعني $\delta\vec{\mathbf{B}}/\delta t$ معدل تغير الحقل المغنطيسي مع الزمن. فالمعادلة الأولى* تعبر عن كيفية تغير الحقل الكهربائي مع الزمن بدلالة مايحدث للحقل المغنطيسي والتيار الكهربائي في تلك اللحظة. في حين أن المعادلة الثانية تعبر عن كيفية تغير الحقل المغنطيسي مع الزمن بدلالة مايحدث للحقل الكهربائي في تلك اللحظة. أما المعادلة الثالثة فهي، بتعبير مبسط فج، صيغة مرمَّزة لقانون التربيع العكسي، وتعبر عن الكيفية التي يكون بها الحقل الكهربائي مرتبطاً (في تلك اللحظة) بتوزيع الشحنات، وتحدثنا المعادلة الرابعة عن الشيء نفسه بالنسبة للحقل المغنطيسي، ماعدا أنه

---

† يورد المؤلف هنا معادلات مكسويل في جملة الواحدات الكهربائية، وهذه المعادلات نفسها تأخذ، في جملة الواحدات "الدولية"، الشكل التالي:

$$1/c^2 \,.\, \delta\vec{\mathbf{E}}/\delta t = -\text{rot}\,\vec{\mathbf{B}} - \mu_o\vec{\mathbf{J}} \quad ; \quad \delta\vec{\mathbf{B}}/\delta t = -\,\text{rot}\,\vec{\mathbf{E}}$$

$$\text{div}\,\vec{\mathbf{E}} = \frac{\rho}{\varepsilon_o} \quad ; \quad \text{div}\,\vec{\mathbf{B}} = 0$$

†† "rot" (أو "curl" في المراجع الأنكلوسكسونية) تعني دوران، أما "div" فتعني "تفرق" (أو يقال "تباعد").

* كان عمل مكسويل الفذ الرئيسي هو استدلاله النظري على وجود $\delta\vec{\mathbf{E}}/\delta t$ في المعادلة الأولى. إذ إن جميع الحدود الأخرى في كل المعادلات كانت، بالفعل، معروفة من الدليل التجريبي المباشر. أما هذا الحد فلم يكن معروفاً بالتجربة لأن معامله $1/c^2$ ضئيل جداً.

لاتوجد "شحنات مغنطيسية" في هذه الحالة (أي لاتوجد جسيمات "قطب شمالي"، أو أخرى "قطب جنوبي" منفصلة).

وتشبه هذه المعادلات إلى حد ما، معادلات هاملتون في أنها تعطينا القيمة التي يجب أن يأخذها معدل تغير الكميتين المهمتين هنا (وهما الحقلان الكهربائي والمغنطيسي) مع الزمن بدلالة قيمتيهما في أي لحظة نشاء. فمعادلات مكسويل إذن ***حتمية*** مثلها مثل النظريات الهاملتونية العادية تماماً، ماعدا فارقاً واحداً -وهو فارق مهم- وهو أن معادلات مكسويل هي معادلات ***حقل*** بدلاً من أن تكون معادلات جسيمات. وهذا يعني أننا نحتاج في معادلات مكسويل إلى عدد غير منتهٍ من الوسيطات لوصف حالة المنظومة (وهي هنا حقل المتجهات في كل نقطة من الفضاء بمفردها)، بدلاً من العدد المنتهي المطلوب فعلاً لوصف جملة من الجسيمات (وهي ثلاثة إحداثيات لموضع كل جسيم وثلاثة لاندفاعه). لذلك كان عدد أبعاد فضاء الطور لنظرية مكسويل ***غير منته*** (ويمكن، كما ذكرت في البدء، جعل معادلات مكسويل مشمولة في إطار هاملتوني عام، ولكن يجب توسيع هذا الإطار توسيعاً يأخذ بعين الاعتبار عدد الأبعاد اللامنتهي في فضاء الطور)(12).

وهكذا نجد أن العنصر الأساسي ***الجديد*** في تصور الحقيقة الفيزيائية، الذي قدمته لنا نظرية مكسويل علاوة على ماكان عليه سابقاً هذا التصور، هو أن ***الحقول*** يجب أن تؤخذ الآن مأخذ الجد بحكم حقيقتها الخاصة بها ولايجوز اعتبارها مجرد ملحقات رياضية بالجسيمات التي كانت هي وحدها "الحقيقية" في نظرية نيوتن. إذ بيَّن مكسويل بالفعل، أنه حين تنتشر الحقول على صورة أمواج كهرطيسية، تحمل معها كميات معينة من ***الطاقة***. بل لقد استطاع أن يعطينا عبارة رياضية واضحة لهذه الطاقة. كما أثبت هرتز بالتجربة فعلاً، عندما استطاع كشف الأمواج الكهرطيسية، صحة هذه الحقيقة الرائعة، وهي أن الطاقة يمكن نقلها من مكان إلى آخر بهذه الأمواج "اللامادية". ولقد أصبح من الأشياء المألوفة لنا أن أمواج الراديو تحمل معها طاقة، على الرغم من أن هذه الحقيقة لاتزال مذهلة بالفعل.

الحسوبية والمعادلة الموجية

استطاع مكسويل أن يستنتج مباشرة من معادلاته أن جميع مركبات الحقلين الكهربائي والمغنطيسي يجب أن تحقق في مناطق الفضاء التي لاتوجد فيها شحنات أو تيارات (أعني حيث يكون $\mathbf{J} = 0$ و $\rho = 0$ في المعادلات المذكورة أعلاه) معادلة تعرف ***بالمعادلة الموجية**** . ويمكن أن نعد هذه المعادلة "ترجمة مبسطة" لمعادلات مكسويل، لأنها معادلة في كمية ***واحدة*** بدلاً من

---

* تكتب هذه المعادلة الموجية (أو معادلة دلامبير) بالصيغة التالية:

$$\{1/c^2\ (\delta/\delta t)^2 - (\delta/\delta x)^2 - (\delta/\delta y)^2 - (\delta/\delta z)^2\}\ \varphi = 0$$

أن تكون معادلة لمركبات الحقلين الكهربائي والمغنطيسي الست. وتعطينا حلولها مثالاً عن السلوك الموجي من دون أن تكون هناك تعقيدات إضافية، ومن ذلك مثلاً "الاستقطاب" في نظرية مكسويل (اتجاه الحقل المتجهي الكهربائي أنظر ص323).

ثم إن للمعادلة الموجية هنا، أهمية أخرى لنا، لأن الدراسة المتعلقة بخواصها ***الحسوبية*** كانت قد أجريت لهذا الغرض صراحة. فقد استطاع بور إل **Marian Boykan Pour El** وريشار **Ian Richards** (1979 و 1981 و 1982 و 1989) أن يثبتا فعلاً أنه على الرغم من ***السلوك الحتمي*** الذي تبديه حلولها - بمعنى أن البيانات المعطاة في لحظة بدء معينة تكفي لتعيين هذه الحلول في جميع اللحظات الأخرى، فإن هناك بيانات ابتدائية حسوبة من نوع "خاص" تتميز بأن قيمة الحقل لأجلها، في لحظة قادمة ***حسوبة***، هي قيمة ***غير حسوبة***، مع أنها معينة تماماً (بالمعادلات)، لذلك يمكن للمعادلات الخاصة بنظرية حقل فيزيائية مقبولة أن تكون، بالمعنى الذي حدده بور-إل وريشار، باعثاً على تطور غير حسوب (حتى وإن لم تكن نظرية مكسويل بالتحديد هي السارية في عالمنا في واقع الأمر).

وهذه نتيجة يصح عليها القول، للوهلة الأولى، إنها مروعة - كما يبدو أنها تناقض ماكنت قد قدرته في المقطع الأخير المتعلق بالحسوبية المرجحة في المنظومات الهاملتونية "المعقولة". إلاّ أن نتيجة بور-إل وريشار لاتناقض في الحقيقة ذلك التخمين مناقضة لها مدلول فيزيائي واضح، على الرغم من أنها في الوقت ذاته مفاجئة وصحيحة حتماً من الناحية الرياضية. والسبب في ذلك أن نوع البيانات الابتدائية "الخاص" بهذه المنظومات، لايتغير برفق[13] وبالطريقة المطلوبة في حقل مقبول ***من الوجهة الفيزيائية***. إذ أثبت بور-إل وريشار فعلاً أن اللاحسوبية ***لايمكن أن تظهر*** في حال المعادلة الموجية إذا رفضنا هذا النوع من الحقول (غير المقبولة فيزيائياً). وفي جميع الأحوال، حتى لو قبلنا بمثل هذه الحقول، فسيكون من الصعب أن نرى كيف يمكن لأي أداة فيزيائية (كالدماغ البشري؟) أن تستفيد من هذه "اللاحسوبية". فهي لايمكن أن يكون لها شأن إلاّ حين يكون بالمستطاع إجراء القياسات بأي دقة نشاء، وهذا كما سبق ذكره، ليس واقعياً جداً من الوجهة الفيزيائية. وعلى رغم ذلك، تمثل نتائج بور إل وريشار خطوة أولى لمجال مهم من الاستقصاء الذي لم يتحقق فيه سوى عمل قليل حتى الآن.

معادلة لورنتز للحركة؛ الجسيمات "الفارة"

تعطينا معادلات مكسويل، عند معرفتنا لتوزيع الشحنات والتيارات، وصفاً رائعاً لطريقة انتشار الحقلين الكهربائي والمغنطيسي. وتُعطى الشحنات من وجهة النظر الفيزيائية في صورة ***جسيمات مشحونة*** - أهمها، كما نعرف الآن، الإلكترونات والبروتونات - وأما التيارات فتنشأ من حركات هذه الجسيمات. فإذا عرفنا إلى أين تتحرك هذه الشحنات وكيف، أعطتنا عندئذ معادلات مكسويل كيف يسير الحقل الكهرطيسي. ولكنها، في هذه الصورة، ليست

مجموعة معادلات مكتملة حقاً، لأنها لاتعرفنا بطريقة تصرف الجسيمات نفسها. وكان جزء من الجواب عن هذا السؤال قد عرف في أيام مكسويل، ولكن لم يكن قد استقر الرأي حتى ذلك الحين على مجموعة مقنعة من المعادلات. وأخيراً استخدم الفيزيائي الهولندي اللامع لورنتز Hendrick Antoon Lorentz في عام 1895 أفكاراً ارتبطت [فيما بعد][†] بأفكار النظرية النسبية الخاصة، فتوصل منها إلى ما يعرف الآن ***بمعادلات لورنتز لحركة جسيم مشحون*** (راجع Whittakar 1910 ص310 و 395). وتعطينا هذه المعادلات كيف تتغير سرعة جسيم مشحون من موضع إلى آخر بسبب الحقلين الكهربائي والمغنطيسي في النقطة التي يصل إليها الجسيم[14]. وعندما نضم هذه المعادلات إلى معادلات مكسويل، نحصل على قواعد لتطور كل من الجسيمات المشحونة والحقل الكهرطيسي مع الزمن.

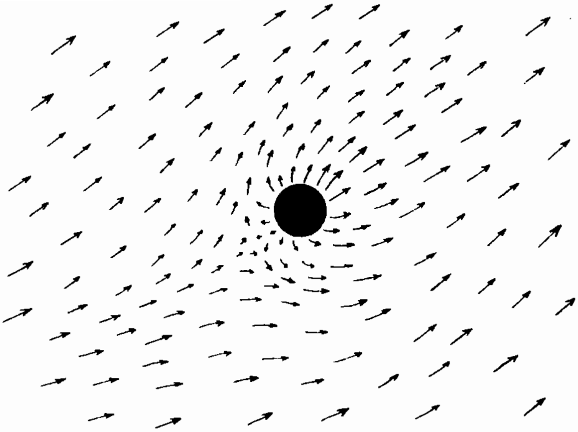
وعلى رغم ذلك، لم يكن كل شيء على وجهه الأكمل بهذه المعادلات، فهي تعطينا نتائج ممتازة حين تكون الحقول منتظمة عند السوية التي هي من قدر أقطار الجسيمات نفسها (يؤخذ هذا القدر بمعيار "نصف القطر الكلاسيكي" للإلكترون - حول 10^{-15} متر)، ولاتكون في الوقت نفسه حركة الجسيمات سريعة جداً. وعلى رغم ذلك، توجد هنا عقبة ***مبدئية*** يمكن أن تصبح خطيرة في ظروف معينة. إن ماتفيدنا به معادلات لورنتز هو دراسة الحقل الكهرطيسي في ***النقطة*** المحددة التي تموضع فيها الجسيم المشحون (فهذا الحقل ضروري لتعيين "القوة" في هذه النقطة). ولكن أين يجب أن نأخذ النقطة إذا كان حجم الجسيم محدوداً؟ هل نأخذ "مركز" الجسيم، أم نأخذ، بدلاً من ذلك، متوسط الحقل على سائر نقاط السطح؟ فقد يؤدي هذا إلى اختلاف النتيجة إذا لم يكن الحقل متجانساً على صعيد الجسيم. بل إن هناك مسألة أكثر حدية وهي: ماهو الحقل في الحقيقة على سطح الجسيم، (أو في مركزه)؟ لنتذكر أننا ننظر في مسألة جسيم ***مشحون***، لذلك يوجد حقل كهرطيسي ***ناشئ عن الجسيم نفسه***، وهذا الحقل لابد أن يُضاف إلى "الحقل" الذي وضع فيه الجسيم. ثم إنه في النقاط القريبة جداً من سطح الجسيم، يصبح الحقل الخاص بالجسيم نفسه هائلاً، وسيخفي بسهولة جميع الحقول الأخرى التي في جواره. وعلاوة على ذلك، يقترب حقل الجسيم من الاتجاه المباشر نحو خارج الجسيم (أو داخله) في جميع الأرجاء حوله، لذلك، لايمكن أن يكون الحقل ***الفعلي*** الناتج الذي فرضنا أن الجسيم يستجيب له، متجانساً على الإطلاق، وإنما سيتجه في مواضع مختلفة على "سطح" الجسيم في اتجاهات عديدة مختلفة، هذا ناهيك عن "داخله" (الشكل 5-15)، والآن لابد أن مسألة القوى المؤثرة في الجسيم قد بدأت تطرح نفسها بكل قوة. فهل ستعمل هذه القوى على تدويره أم على تشويهه؟ وهنا تعرض لنا مسألة أخرى تتعلق بخواصه المرونية إلخ (ويوجد هنا

[†] في عام 1905 و 1906

أيضاً، وبوجه خاص نتائج إشكالية تتعلق ***بالنسبية***. ولكنني لن أشغل بها ذهن القارئ). فالمسألة، كما هو واضح، أكثر تعقيداً بكثير مما بدت عليه في بادئ الأمر.

قد يكون من الأفضل لنا أن ننظر إلى الجسيم بأنه جسيم نقطي. غير أن هذا الأمر يؤدي بنا إلى مشاكل من نوع آخر، لأن الحقل الكهربائي الخاص بالجسيم يصبح في هذه الحالة ***لانهائياً*** في حواره المباشر. فإذا لزم الأمر، تبعاً لمعادلات لورنتز، أن يستجيب الجسيم للحقل الكهرطيسي الذي هو نفسه مقيم فيه، عندئذ عليه أن يستجيب لحقل لانهائي! فلكي نجعل لقانون لورنتز للقوة معنى، يجب أن نجد طريقة ***للتخلص من الحقل الخاص بالجسيم*** لكي لانبقي سوى الحقل الخارجي الذي يخضع له الجسيم دونما أي التباس. أما مسألة كيف نفعل ذلك، فهي مسألة كان قد حلها ديراك (الذي سنتحدث عنه فيما بعد) عام 1938. وعلى رغم ذلك فقد أدى حل ديراك إلى بعض النتائج غير المطمئنة. فقد وجد أنه لايكفي معرفة موضع كل جسيم ومتجهة سرعته الابتدائيين، بل يجب معرفة ***تسارعه*** الابتدائي أيضاً لكي يتعين سلوك الجسيمات وحقولها فيما بعد من هذه المعطيات (وهذا وضع شاذ في سياق النظريات الديناميكية السائدة). ويتصرف الجسيم أخيراً (من أجل معظم القيم التي تُعطى للتسارع الابتدائي) تصرفاً لاضابط له أبداً. إذ يتسارع تلقائياً حتى تقترب سرعته من سرعة الضوء! وتلك هي "حلول ديراك الفرارية" **Runaway Solutions** التي ليس لها ما يماثلها أبداً فيما يحدث فعلاً في الطبيعة. لذلك يجب أن نجد طريقة لتجنب الحلول الفرارية، وذلك بأن نختار التسارعات الابتدائية بالطريقة القويمة فحسب، وهذا مايمكن القيام به دائماً، ولكن بشرط أن ***نمارس "قدرة على التنبؤ"*** - وهذا يعني أن على المرء أن يحدد التسارعات الابتدائية بطريقة تنبئ سلفاً بما هي الحلول التي ستصبح أخيراً فرارية وأن يتجنبها. فهذه الطريقة تختلف كل الاختلاف عن الطريقة التي يجب أن تعين بها الشروط الابتدائية حين يتعلق الأمر بمسائل فيزيائية حتمية قياسية. إذ إن البيانات يمكن أن تعطى في الحتمية التقليدية، بطريقة اختيارية، ومن دون أن تكون مشروطة بأي شرط يتعلق بالكيفية التي يجب أن يكون بها سلوك المستقبل. أما في هذه الحالة، فليست المسألة في أن المستقبل معيَّن كلياً بمعطيات يمكن تحديدها في لحظة واحدة ماضية فحسب، بل إن تحديد هذه البيانات مشروط بدقة بمطلب أن يكون التصرف في المستقبل "معقولاً" فعلاً!

هذا فيما يتعلق بما نخرج به من المعادلات الكلاسيكية الأساسية. وسيتحقق القارئ أن قضيتي الحتمية والحسوبية قد أصبحتا مشوشتين تشويشاً مضطرباً جداً في قوانين الفيزياء الكلاسيكية. فهل ثمة عنصر ***غائي*** فعلاً في قوانين الفيزياء؟ وهل يؤثر المستقبل، بطريقة أو بأخرى، فيما يُسمح بحدوثه في الماضي؟ إن الفيزيائيين، في واقع الأمر، لايأخذون عادة هذه المضامين في ***الإلكتروديناميك الكلاسيكي*** (أي في نظرية الجسيمات المشحونة والحقلين الكهربائي والمغنطيسي الكلاسيكي) بأنها وصف جدي للواقع. ويردون عادة على الصعوبات



الشكل 5-15: كيف نطبق بصرامة معادلات لورنتز للحركة؟ إذ لايمكن أن نحصل على القوة المؤثرة في جسيم مشحون بمجرد فحص الحقل في مكان وجود الجسيم، لأن الحقل الخاص بالجسيم يكون مسيطراً في هذا الموضع.

المذكورة بقولهم إن الجسيمات المشحونة الإفرادية تخص مجال ***الإلكترودیناميك الكمومي***، فلايمكن أن نتوقع الحصول على أجوبة معقولة باستخدام إجراء كلاسيكي حصراً. وهذا صحيح لاريب فيه، ولكن النظرية الكمومية ***نفسها***، كما سنرى، تعاني المشاكل في هذا المجال. فديراك، كان قد درس مسألة ديناميك الجسيمات المشحونة الكلاسيكية ***بدقة، لأنه*** اعتقد أنها يمكن أن توفر له رؤى لحل معضلات أساسية أعظم في ***المشكلة الكمومية (الأنسب فيزيائياً)***. ولابد لنا من مواجهة مشاكل النظرية الكمومية فيما بعد.

نسبية أينشتين وبوانكاريه الخاصة

لنتذكر أن مبدأ النسبية الغاليلية ينص على أن قوانين غاليليه ونيوتن النسبية تظل على حالها نفسه من دون تغيير إذا انتقلنا من هيكل اسناد (جملة محاور) ساكن إلى آخر متحرك. لذلك لايمكننا أن نتوصل من مجرد فحص السلوك الديناميكي للأجسام المجاورة لنا، إلى معرفة هل نحن واقفون أم نتحرك بسرعة منتظمة في اتجاه ما. (لنتذكر مركب غاليليه في البحر. ص 205). ولكن لنفرض أننا ضممنا معادلات مكسويل إلى هذه القوانين (الديناميكية)، فهل تظل نسبية

غاليليه صحيحة؟ لقد رأينا أن أمواج مكسويل الكهرطيسية تنتشر بسرعة ثابتة c، هي سرعة الضوء. فلو كنا ننتقل بسرعة كبيرة، في اتجاه ما، لصور لنا حسنا السليم، أن سرعة الضوء في هذا الاتجاه يجب أن تبدو لنا وقد **هبطت** إلى مادون c (لأننا نسعى وراء الضوء عندئذ "للحاق به وإدراكه"). وأما سرعة الضوء الظاهرية في الاتجاه المعاكس، فيجب أن **تزيد** عن c (لأننا نفر عندئذ من الضوء) - مما يجعل سرعة الضوء تختلف عن قيمة c **الثابتة** في معادلات مكسويل. والحقيقة، أن حسنا السليم صحيح، أي أن جمع قوانين نيوتن مع معادلات مكسويل يؤدي إلى مجموعة **لاتحقق** النسبية الغاليلية.

وعند انشغال أينشتين بهذه الأمور، أدى به البحث في عام 1905 - وقبله بوانكاريه بين عامي 1898-1905 - إلى نظرية النسبية الخاصة. فقد وجد بوانكاريه وأينشتين، كل بمفرده، أن معادلات مكسويل تحقق **أيضاً** صورة لمبدأ النسبية (أنظر Pais 1982) أي أن معادلات مكسويل تتصف بخاصة مشابهة هي أنها تبقى من دون تغيير (أي تظل صامدة) إذا انتقلنا من هيكل إسناد ساكن إلى هيكل متحرك بالنسبة للأول، وإن كانت قواعد هذا الانتقال **لاتتفق** مع قواعد الانتقال في الفيزياء الغاليلية - النيوتنية! وإذا أردنا أن تتفق هذه القواعد مع تلك، فلابد عندئذ من تعديل إحدى مجموعتي المعادلات أو الأخرى - وإلا وجب أن نتخلى عن مبدأ النسبية.

لم يكن أينشتين ميالاً للتخلي عن مبدأ النسبية، لأن حسه الفيزيائي الغريزي جعله يصر على أن هذا المبدأ يجب حقاً أن يلازم قوانين الفيزياء في عالمنا. أضف إلى ذلك أنه كان يعرف حق المعرفة أن فيزياء غاليليه-نيوتن بالنسبة لجميع الظواهر المعروفة، لم تكن قد اختبرت عملياً إلاّ في حالات سرعات ضئيلة جداً بالنسبة لسرعة الضوء، لذلك لم يكن عدم اتفاق هذه الفيزياء مع مبدأ النسبية واضحاً بمثل هذا الوضوح. وكان يعرف أن **سرعة الضوء** وحدها هي التي تتطلب سرعات كبيرة جداً لكي يكون عدم الاتفاق هذا واضحاً. لذلك يجب أن نعرف من سلوك **الضوء** ماهو مبدأ النسبية الذي يجب أن نتبناه - أما هذا السلوك فنتعرفه من معادلات مكسويل فهي الضابط له. فيجب الاحتفاظ إذن بمبدأ النسبية المتفق مع هذه المعادلات، كما يجب تعديل قوانين غاليليه-نيوتن لكي تتفق معه.

وكان لورنتز قد اهتم بهذه المسألة وحلها جزئياً قبل بوانكاريه وأينشتين. وكان قد تبنى نحو عام 1895 وجهة النظر القائلة إن القوى التي تجعل أجزاء الشيء المادي متماسكة هي قوى كهرطيسية بطبيعتها (كما تبين فعلاً فيما بعد)، لذلك يجب أن يحقق سلوك الأجسام المادية الحقيقية القوانين المستخرجة من معادلات مكسويل. وقد اتضح له أن أحدى نتائج هذه الفرضية هي أن الجسم المتحرك بسرعة يمكن مقارنتها بسرعة الضوء يجب أن ينكمش قليلاً في

اتجاه الحركة (انكماش فيتجزرالد- لورنتز Fitzgerald Lorentz). وكان لورنتز قد استخدم هذا الانكماش لتفسير النتيجة السلبية المحيرة التي تمحضت عنها تجربة ميكلسون ومورلي Michelson, Morley عام 1887 إذ دلت على أنه لايمكن استخدام الظواهر الكهرطيسية لتعيين السكون المطلق لهيكل إسناد ما. (فقد أثبت ميكلسون ومورلي أن سرعة الضوء الظاهرية على سطح الأرض لاتتأثر بحركة الأرض حول الشمس - وكان هذا مناقضاً جداً للتوقعات). فياترى هل تتصرف المادة هكذا دائماً بطريقة لايمكن معها كشف حركتها (المنتظمة) محلياً؟ هذا ماكان ***بالتقريب*** هو استنتاج لورنتز، ناهيك عن أنه كان مقيداً بنظرية محددة في المادة لايوجد فيها قوى ذات أثر سوى القوى الكهرطيسية. أمّا بوانكاريه، فلكونه رياضياً بارزاً، فقد استطاع أن يثبت عام 1905 أن ليس أمام المادة سوى طريقة واحدة لأن تتصرف فيها وفقاً لمبدأ النسبية المتضمن في معادلات مكسويل. لذلك لايمكن أن نكتشف محلياً أية حركة انسحابية منتظمة. وقد توصل إلى فهم أوسع لمضامين هذا المبدأ (بما فيها "نسبية التزامن" التي سنراها عما قريب). ويبدو أنه كان يرى فيه مجرد ***إمكانية*** من الإمكانيات، ولم يشاطر أينشتين الاعتقاد بأنه ***لابد*** من وجود مبدأ ملزم للنسبية يظل سامياً أبداً †.

والحقيقة أنه يصعب إلى حد ما استيعاب مبدأ النسبية الذي تحققه معادلات مكسويل - الذي يعرف ***بالنسبية الخاصة*** - إذ إن لهذا المبدأ سمات لاحدسية لايمكن التسليم في بادئ الأمر بأنها من خواص العالم الذي نعيش فيه. وهذا صحيح، فالنسبية الخاصة لايمكن أن تفهم بالصورة اللائقة من دون التصور ***الأبعد*** الذي أدخله في عام 1908 الرياضي الروسي/الألماني ذو البصيرة الأصيلة منكوفسكي Hermann Minkowsky (1864-1909). وكان منكوفسكي هذا أحد أساتذة أينشتين في بولتكنيك زوريخ. وكانت فكرته الأساسية الجديدة تتلخص في أن المكان والزمان يجب اعتبارهما معاً كياناً واحداً أطلق عليه اسم: المكان-الزمان (الزمكان) ***الرباعي الأبعاد***. فقد أعلن منكوفسكي في عام 1908 في محاضرة ألقاها في جامعة غوتنغن الفكرة التالية:

> ***لقد حكم على المكان ذاته، وعلى الزمان أيضاً، أن يضمحلا منذ الآن إلى مجرد طيفين، وألاّ يبقى واقع مستقل إلاّ لاتحادهما معاً.***

لذلك سنحاول أن نفهم أسس النسبية الخاصة في لغة الزمان-المكان أو (الزمكان) المعبرة التي أتى بها منكوفسكي.

---

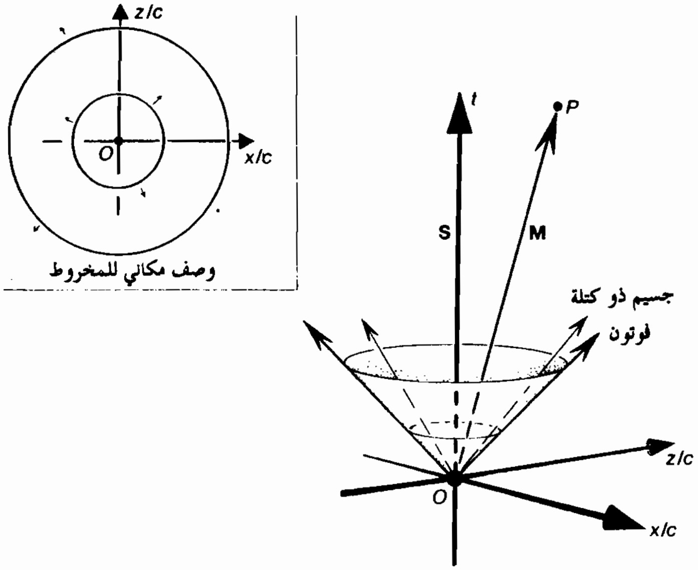
† كان بوانكاريه يعتقد أن أي ظاهرة يمكن تفسيرها بعدة فرضيات. ولكنه عبّر في كتابه "العلم والفرضية" عن أن مبدأ النسبية يفرض نفسه علينا بقوة.

تأتي إحدى صعوبات التعبير عن مفهوم الزمكان من أنه ***رباعي الأبعاد***، وهذا ما يجعل تصوره صعباً، ولكن بعد أن تخطينا سالمين لقاءنا مع فضاء الطور فلن نجد صعوبة مع مجرد أبعاد أربعة! بل نلجأ كما في السابق إلى "الحيلة" ونتصور فضاء ذا أبعاد أقل – ولكن احتيالنا الآن أخف بما لايقاس من السابق، وسيكون تصورنا بالمقابل أكثر دقة. إن بعدين (واحد للمكان وآخر للزمان) يكفيان عادة لأغراض كثيرة. ولكني أستميح القارئ عذراً في أن أغامر قليلاً وأتمادى إلى الثلاثة أبعاد (اثنان للمكان وواحد للزمان). فسيعطينا ذلك صورة جيدة لن نجد معها صعوبة في قبول إمكانية تمديد الفكرة مبدئياً، من دون تغيير كبير، إلى حالة الأبعاد الأربعة كاملة. والفكرة التي يجب أن تظل في أذهاننا بشأن هذا المخطط هي أن كل نقطة منه تمثل حادثاً – أي نقطة في المكان في لحظة معينة، لأن النقطة في الفضاء ليست سوى وجود ***آني***. فالمخطط بأكمله يمثل التاريخ بأكمله: ماضيه وحاضره ومستقبله. ولما كان كل جسيم يحافظ على بقائه فترة من الزمن، فهو لايمثل بنقطة وإنما بخط يسمى ***خط كون*** world-line ذلك الجسيم. فهذا الخط يصف تاريخ الجسيم طيلة بقائه، وهو مستقيم إذا كانت حركة الجسيم منتظمة، ومنحن إذا كانت متسارعة.

ولقد صورت في الشكل 5-16 زمكاناً ذا بعدين مكانيين وبعد زماني واحد. ونتخيل أن الإحداثي الزماني t يقاس في المنحى الرأسي، وأن الإحداثيين المكانيين $\frac{x}{c}$ و $\frac{z}{c}$ يقاسان في المستوي الأفقي*. ويمثل المخروط عند المركز ***مخروط الضوء*** (المستقبلي) لمبدأ الزمكان O. ولفهم مدلول هذا المخروط، نتخيل انفجاراً يحصل عند O (الحادث O). (فالانفجار يحصل إذن عند مبدأ الإحداثيات المكانية في الزمن $t = 0$). فمخروط الضوء هذا هو تاريخ الضوء الصادر عن الانفجار. أما تاريخ الومضة الضوئية في مكان ذي بعدين (x و z) فيعبر عنه بدائرة تتوسع بسرعة الضوء c. وأما في مكان كامل ثلاثي الأبعاد فسيكون تاريخ الضوء **كرة تتوسع** بالسرعة c. –هي في الحقيقة الجبهة الكروية لموجة الضوء– ولكننا ***حذفنا*** هنا (في الشكل) المنحى المكاني y، لذلك حصلنا على دائرة تشبه دوائر تموجات سطح الماء المنبعثة من نقطة سقوط حجر قذف فيه. ونستطيع أن نرى هذه الدوائر في مخطط الزمكان بأخذ مقاطع أفقية متتابعة نحو الأعلى للمخروط. تمثل المستويات الأفقية في المخطط وصفاً مكانياً لأوضاع مختلفة بحسب تزايد الإحداثي الزمني t. والآن، إن من سمات النظرية النسبية أنها تقول باستحالة حركة جسيم مادي بسرعة تفوق سرعة الضوء (وسنتحدث عن ذلك أكثر فيما بعد). فجميع الجسيمات المادية المنبعثة من الانفجار يجب أن تتخلف عن الضوء. وهذا يعني في لغة الزمكان أن خطوط الكون للجسيمات المنبعثة من الانفجار يجب أن تقع ***داخل*** مخروط الضوء.

---

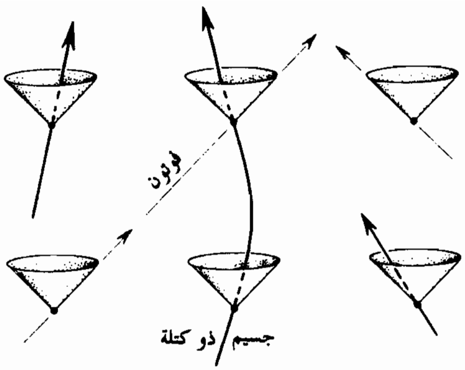
* إن السبب في تقسيم الإحداثيين المكانيين على c –سرعة الضوء– هو جعل خطوط الكون للفوتونات تميل بزاوية 45° على المنحى الرأسي. وهذا شيء مريح (انظر مايلي).



الشكل 5-16: يمثل هذا الشكل أحد مخاريط الضوء في زمكان منكوفسكي (فيه بعدان مكانيان فحسب)، وهو يصف تاريخ ومضة ضوئية من انفجار حصل عند الحادث O، أي عند مبدأ الزمكان.

وغالباً مايكون وصف الضوء بلغة ***الجسيمات*** -التي تدعى ***فوتونات***- بدلاً من لغة الموجات الكهرطيسية هو المناسب، ولابأس في أن نتصور "الفوتون" حالياً في صورة "حزمة" صغيرة من اهتزاز الحقل الكهرطيسي العالي التواتر. والحقيقة أن لغة الفوتونات ستكون أنسب في سياق الوصف ***الكمومي*** الذي سندرسه في الفصل القادم، غير أن الفوتونات في الفضاء الخالي تسير في خطوط مستقيمة بالسرعة c. وهذا يعني أن خط الكون للفوتون يُرسم دائماً في زمكان منكوفسكي بصورة خط مستقيم يميل على المنحى الرأسي بزاوية 45°، فالفوتونات المنبعثة من الانفجار عند O ترسم مخروط الضوء الذي رأسه عند O.

ويجب أن تتوافر هذه الخواص بوجه عام في جميع نقاط الزمكان من دون وجود شيء خاص بالمبدأ O، فهو لايختلف عن أية نقطة أخرى. ولابد أن يكون هناك مخروط ضوء يحمل المعنى نفسه، في كل نقطة من الزمكان وشأنه شأن مخروط الضوء في المبدأ. أي أن تاريخ أي وميض ضوئي - أو إذا كنا نفضل الوصف الجسيمي للضوء، نقول إن خطوط الكون للفوتونات- **تقع** دائماً، وفي أي نقطة، على امتداد مخروط الضوء فيها. أما تاريخ أي جسيم مادي فيجب أن يقع داخل مخرط الضوء لأية نقطة يمر فيها. الأمر الذي وضحناه في الشكل 5-17. فيجب أن تعد أسرة مخاريط الضوء في جميع النقاط جزءاً من ***هندسة منكوفسكي*** للزمكان.



الشكل 5-17: شكل يمثل هندسة فضاء منكوفسكي.

ترى مانوع "هندسة منكوفسكي"؟ حقاً إن البنية المؤلفة من مخاريط الضوء هي أهم سماتها، إلاّ أن في هندسة منكوفسكي أيضاً ماهو أهم، إذ إن هناك مفهوم "المسافة" الذي لايختلف كثيراً عن مثيله في هندسة إقليدس. فالمسافة التي تفصل نقطة (x, y, z) عن المبدأ في هندسة إقليدس للأبعاد الثلاثة، تعطى بدلالة الإحداثيات الديكارتية العادية بالعبارة:

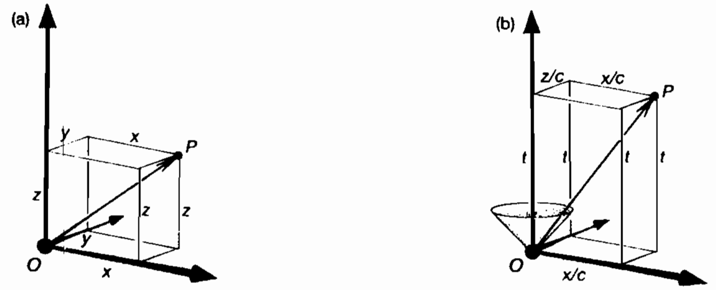
$$r^2 = x^2 + y^2 + z^2$$

(أنظر الشكل 5-a18، فهذه العبارة هي نظرية فيثاغورس لاأكثر – وإن كانت مألوفة أكثر، ربما، في حالة البعدين). أما في هندسة منكوفسكي الثلاثية الأبعاد، فعبارة المسافة تشبه تلك كثيراً في صيغتها (الشكل 5-b18) والاختلاف الأساسي هو أن لدينا الآن إشارتي ***ناقص***:

$$s^2 = t^2 - (x/c)^2 - (z/c)^2$$

والصحيح أكثر طبعاً، هو أن لدينا هندسة منكوفسكية رباعية الأبعاد، فعبارة "المسافة" فيها يجب أن تكون:

$$s^2 = t^2 - (x/c)^2 - (y/c)^2 - (z/c)^2$$



$$OP^2 = x^2 + y^2 + z^2 \qquad OP^2 = t^2 - (x/c)^2 - (z/c)^2$$

الشكل 5-18: مقارنة بين قياس "المسافات" في هندسة إقليدس (a) وهندسة منكوفسكي (b) (حيث تعني "المسافة" "زمناً ممارساً").

ترى ماالمعنى الفيزيائي لمقدار "المسافة" s في هـذه العبـارة؟ لنفـرض أن النقطـة المعنيـة – أي النقطـة p الـتي إحداثياتهـا $\{t, \frac{x}{c}, \frac{z}{c}\}$ أو في الحالـة الثلاثيـة الأبعــاد $\{t, \frac{x}{c}, \frac{y}{c}, \frac{z}{c}\}$ أنظـر الشكل 5-16 – تقع داخل مخروط الضوء (الخاص بالمستقبل) في النقطـة O. فالقطعـة المسـتقيمة OP تمثل جزءاً من تاريخ جسيم مادي – كأن تكون جسيماً منطلقاً مـن انفجـار مـا. "فطـول" القطعة OP المنكوفسكي (s) له تفسير فيزيائي مباشر، إنه ***الفترة الزمنية*** التي "قضاهـا" الجسـيم بين الحـادث O والحـادث P. وهـذا يعـني أنـه إذا وجـدت ميقاتيـة متينـة ودقيقـة ومثبتـة بهـذا الجسيم[15]، عندئـذ يكـون فرق الزمنـين المسـجلين عليهـا عنـد O وعنـد P هــو بــالتحديد s فالاحداثي الزمني t، خلافاً للتوقعات، ليس المقدار نفسـه الذي يمثل الزمن الذي تقيسـه ميقاتيـة دقيقة، وهو لايصبح كذلك إلا إذا كانت هـذه الميقاتيـة سـاكنة بالنسبة لمنظومـة الإحداثيـات (أعني إلا إذا كانت إحداثياتها $\frac{x}{c}, \frac{y}{c}, \frac{z}{c}$ ذات قيم ثابتة)، الأمر الذي يعني أن الميقاتية لها خـط كون رأسي في المخطط. فـ "t" لاتعني "الزمن" إلا بالنسبة لراصدين واقفين (أعني أن خطوطهـم الكونية رأسية) أما قياس الزمن الصحيح بالنسبة لراصـد متحـرك (يتحـرك بانتظـام مبتعـداً عـن المبدأ O) فهو، تبعاً للنسبية الخاصة، الكمية s.

وهذه حقيقة مذهلة – وعلى خلاف تام مع القياس الغاليلي-النيوتني الفطـري لـلزمن، فهـو عندهما ببساطة قيمة الإحداثي t. ولنلاحظ أن قياس الزمن النسبوي (المنكوفسكي) s، هو أقـل دائماً إلى حد ما من t في حال وجود أدنى حركة (إذ يتضح من المعادلة أعلاه أن s^2 أقل من t^2 مادامت $\frac{z}{c}$ و$\frac{y}{c}$ و$\frac{x}{c}$ ليست كلها أصفاراً)، فالحركة (أعني حين لايكون OP على امتداد محـور الزمن t) تسعى إلى "إبطاء" الساعة بالمقارنة مع t – أعني بالنسبة لما يجـري في جملـة إحداثياتنـا. فحين تكون سرعة هذه الحركة صغيرة بالمقارنـة مـع c، تكـون s و t متسـاويتين تقريبـاً، الأمـر الذي يفسر عدم إدراكنا المباشر لتباطؤ الميقاتية المتحركة. أما في أقصى الطرف الآخر، أي حين تكون السرعة هي سرعة الضوء نفسها، عندئذ تقع P علـى مخـروط الضـوء، ونجـد أن $s = 0$. فمخروط الضوء هو بالتحديد مجموعة النقـط التي "بعدهـا" المنكوفسـكي عن O (أعني الزمـن) هو صـفر. فالفوتـون لايعانـي إذن مرور الزمـن إطلاقـاً (و"لايحـق" لنا تجاوز الحالـة القصـوى، حين تتحرك P خارج مخروط الضـوء، إذ إن ذلك يعني أن تأخـذ s قيمـة تخيليـة – أي الجـذر التربيعي لعـدد سـالب – وتخرق القاعـدة القائلة إن الجسيمات الماديـة أو الفوتونات لايمكن أن تسير بسرعة تتجاوز سرعة الضوء*).

وينطبق هذا المفهوم المنكوفسكي "للمسافة" أيضاً، على ***أي زوج من نقاط الزمكان*** بشـرط أن تكون إحدى النقطتين واقعة في مخروط الضوء للأخرى – أي حين يمكن لجسيم ماأن ينتقـل من إحداهما إلى الثانية. وإذا اعتبرنا ببسـاطـة أن O انتقلت إلى نقطـة أخرى في الـزمكان، فإن

---

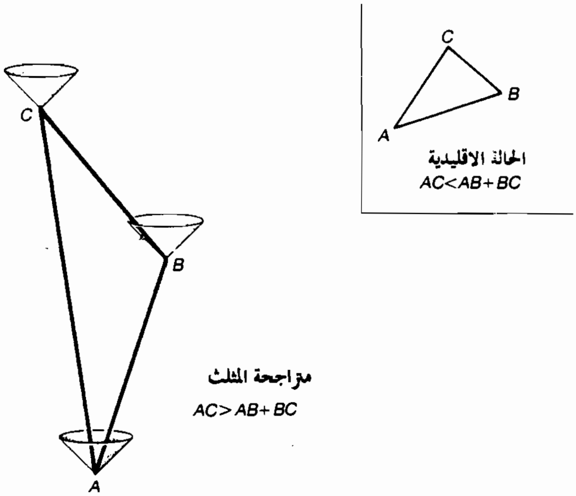
* وعلى الرغم من ذلك هناك حوادث تفصل بينها قيمة سالبة لِ s^2، ويكون للكمية $c\sqrt{-s^2}$ معنى، وهي أنها مسافة ***عادية***، وذلك بالنسبة للراصد الذي يظهر له هذان الحادثان متزامنين (راجع القسم الأخير).

المسافة المنكوفسكية بين النقطتين [المذكورتين] تقيس أيضاً الفترة الزمنية التي تسجلها ميقاتية تتحرك من إحداهما إلى الأخرى بانتظام. وحين نجيز للجسيم بأن يكون فوتوناً، تكون المسافة المنكوفسكية بين النقطتين صفراً، وتكون كل من النقطتين واقعة على مخروط الضوء للأخرى – وتستخدم هذه الحقيقة في ***تعريف*** مخروط الضوء لتلك النقطة.

يكمن جوهر النسبية الخاصة في الحقيقة، في البنية الأساسية لهندسة منكوفسكي التي يقاس فيها "طول" خطوط الكون بهذه الطريقة الغريبة التي أُوِّلت بأنها ***الزمن*** الذي تقيسه (أو تقضيه) ميقاتيات فيزيائية. ونخص بالذكر هنا المفارقة التي تدعى "مفارقة التوأمين" التي قد يكون القارئ على علم بها، والتي يبقى فيها أحد التوأمين على الأرض بينما يرحل الثاني إلى نجم قريب ويعود منه سائراً في الذهاب والإياب بسرعة كبيرة تقرب من سرعة الضوء. لقد تبين أن التوأمين بعد عودة المسافر يختلفان في عمريهما، إذ يجد المسافر نفسه أنه لايزال شاباً، في حين أصبح أخوه الذي ظل على الأرض، مسناً. وهذا أمر يسهل وصفه في هندسة منكوفسكي – إذ يرى المرء أنها، على الرغم من كونها ظاهرة محيرة، ليست مفارقة حقيقية. فإذا كان AC يمثل الخط الكوني للذي بقي على الأرض، يكون الخط الكوني للمسافر مركباً من قطعتين AB و BC. تمثلان مرحلتي الرحلة، الذهاب والإياب. فالتوأم الباقي على الأرض عاش الزمن الذي يقيسه AC، بينما عاش المسافر الزمن المعطى بمجموع[16] المسافتين AB و BC، وهذان الزمنان (زمن الرحلة وزمن البقاء) ليسا متساويين، وإنما نجد العلاقة:

$$AC > AB + BC$$

التي تظهر بالفعل أن الزمن الذي عاشه التوأم الذي بقي على الأرض، أطول من الزمن الذي عاشه الراحل.



الشكل 5-19: يمكن فهم مفارقة النسبية الخاصة التي تدعى "مفارقة التوأمين" بعبارة متراجحة المثلث المنكوفسكي (وقد أعطينا الحالة الإقليدية أيضاً للمقارنة).

تبدو المتراجحة أعلاه بديلاً نظيراً *لمتراجحة المثلث* المعروفة في الهندسة الإقليدية العادية. (أي: إذا كانت A, B, C ثلاث نقاط ليست على استقامة واحدة في فضاء إقليدي فعندئذٍ)

$$AC < AB + BC$$

وهذه المتراجحة، تنص على أن مجموع ضلعين في مثلث *أكبر* دائماً من الضلع الثالثة. الأمر الذي لايمكن أن ننظر إليه بأنه مفارقة! فنحن مؤتلفون كل الائتلاف مع الفكرة القائلة إن قياس المسافة الإقليدي على طول مسار من نقطة إلى أخرى (هنا من A إلى C) يتوقف على المسار الفعلي الذي نتخذه. (والمساران في هذه الحالة هما AC والطريق الأطول ABC). وهذا مثال عن فكرة أن أقصر مسافة بين نقطتين (وهنا A و C) تُقاس على طول الخط المستقيم الواصل بينهما (الخط AC) أما قلب إشارة المتراجحة في الحالة المنكوفسكية فينشأ من تغيرات الإشارة في تعريف "المسافة"، لذلك أصبحت AC المنكوفسكية *"أطول"* من الطريق ABC. وهذه النتيجة في فضاء منكوفسكي، هي حالة خاصة من نتيجة أعم تقول: إن أطول خط كوني (بمعنى أطول زمن مُمارس) بين الخطوط الكونية الواصلة بين حادثين هو المستقيم (أعني الذي لاتسارع فيه). فإذا بدأ توأمان عند حادث واحد A وانتهيا عند الحادث نفسه C، وتحرك الأول مباشرة من A إلى C من دون تسارع، أما الثاني فقد تسارع، عندئذ يكون الزمن الذي أمضاه الأول عندما التقيا ثانية أطول من الزمن الذي أمضاه الثاني.

فإدخال مفهوم غريب كهذا لقياس الزمن، قد يبدو عملاً أخرق، لاختلافه عن أفكارنا الحدسية، إلا أن هناك الآن أدلة تجريبية عديدة تؤيده. هناك مثلاً جسيمات تحت ذرية عديدة تتفكك (أي تتجزأ إلى جسيمات أخرى) في سلم زمني معين. وتسير هذه الجسيمات أحياناً بسرعات تقرب من سرعة الضوء. (كالأشعة الكونية مثلاً التي تصل الأرض من الفضاء الخارجي البعيد، أو الجسيمات في المسرعات الجسيمية الصناعية). فزمن تفكك هذه الجسيمات (أو عمرها) يطول بالطريقة نفسها التي نستنتجها من الملاحظات السابقة. والحقيقة التي تدهشنا أكثر من هذه، أن الساعات (أي "الساعات النووية") التي تصنع الآن هي من الدقة بحيث، يمكن أن نكتشف بها *مباشرة* آثار تباطؤ الزمن نتيجة لنقل هذه الساعات في الطائرات السريعة جداً التي تطير على علو منخفض. وقد اتفقت النتائج مع قياس "المسافة" المنكوفسكية s وليس مع t! (وللتقيد بالدقة التامة، أخذ ارتفاع الطائرة بعين الاعتبار، وضُمِّنت الحسابات آثار الثقالة الإضافية الصغيرة، تبعاً *للنسبية العامة*، فاتفقت هذه أيضاً مع المشاهدة، كما سنرى في المقطع التالي). وهناك إضافة إلى ماسبق نتائج ترتبط ارتباطاً حميماً بالهيكل العام للنسبية الخاصة، وهي تلقى باستمرار تأكيداً تجريبياً مفصلاً. وإحدى هذه النتائج، علاقة أينشتين الشهيرة:

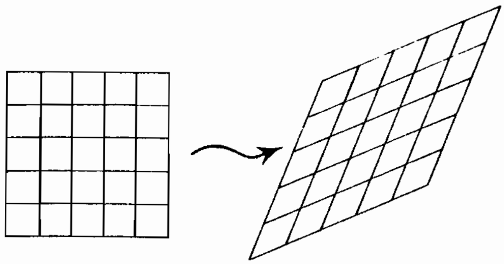
$$E = mc^2$$

التي تساوي في الحقيقة بين الطاقة والكتلة، فهي تؤدي، كما سنرى في نهاية هذا الفصل، إلى نتائج مغرية بعيدة المنال بالنسبة لنا.

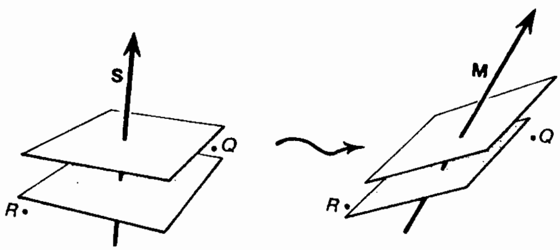
على أني لم أشرح بعد كيف ينضوي مبدأ النسبية في هذا المخطط العام، أو كيف يمكن أن يكون الراصدون المتحركون بمختلف السرعات المنتظمة ***متكافئين*** بالنسبة للهندسة المنكوفسكية؟ أو كيف يمكن لمحور الزمن في الشكل 5-16 (أي خط الراصد المتوقف) أن يكون مكافئاً بكل معنى الكلمة لأي خط كوني مستقيم آخر، وليكن على امتداد OP (أيْ خط راصد متحرك)؟ لفهم ذلك، سوف نركز تفكيرنا أولاً على الهندسة ***الإقليدية***: إن من الواضح أن نظريات هذه الهندسة بالنسبة لأحد مستقيمين بمفرده، هي نفسها بالنسبة للآخر (اي أن المستقيمين متكافئان فيما يتعلق بالهندسة ككل). بالفعل، من السهل أن نتصور أن الفضاء الإقليدي كله قد "انزلق ككتلة صلبة على نفسه" إلى أن انطبق أحد المستقيمين على الآخر. ويسهل تصور ذلك إذا اكتفينا بحالة البعدين، أي ***المستوي*** الإقليدي. إذ ينزلق المستوي على نفسه كما تنزلق ورقة دون تشوهها على سطح مستوٍ إلى أن ينطبق مستقيم ما مرسوم عليها على مستقيم آخر مرسوم على السطح. فمن الواضح أن الحركة الصلبة تحافظ على بنية الهندسة. وكذلك ثمة شيء مماثل لهذا ينطبق على الهندسة المنكوفسكية، وإن كان بوضوح أقل، إذ على المرء أن يركز انتباهه على ماتعني كلمة "صلب". والآن، يجب أن نأخذ بدلاً من قطعة الورق التي جعلناها تنزلق على السطح، نوعاً خاصاً من المادة، مكتفين في البدء، للسهولة، بحالة البعدين، وبصورة تحافظ معها مناحي الميل 45° على ميلها 45° بينما يتاح للمادة أن تتمدد في أحد هذين المنحيين وتنكمش في المنحى الآخر. الأمر الذي مثلناه في الشكل 5-20 أما في الشكل 5-21 فقد حاولت أن أوضح ماهي الأمور التي شملها هذا التحول في الأبعاد الثلاثة. ومن الواضح أن هذه الحركة "الصلبة" التي تدعى ***حركة بوانكاريه*** (أو حركة لورنتز غير المتجانسة) يمكن ألا تبدو مثل حركة جسم "صلب" بكل معنى الكلمة، ولكنها تحافظ على جميع المسافات المنكوفسكية، و"المحافظة على هذه المسافات" هو مايرمي إليه قولنا حركة "صلبة" في الهندسة الإقليدية. وليس مبدأ النسبية الخاصة سوى التأكيد على أن الفيزياء لايطرأ عليها أي تغيير من جراء حركة بوانكاريه في الزمكان. ونخص بالذكر، أن الفيزياء عند الراصد المتوقف S الذي خطه الكوني هو محور الزمن في الصورة المنكوفسكية الأصلية (الشكل 5-16)، مكافئة بكليتها لفيزياء الراصد "المتحرك" M الذي خطه الكوني على امتداد OP.

يمثل كل مستوٍ، معادلته من الشكل t = ثابت، "الفضاء" في "زمن" معين t بالنسبة للراصد S، أي أن هذا المستوي هو طائفة الحوادث التي ينظر إليها الراصد S في الزمن t بأنها متزامنة (أي أنها حدثت كلها في "الزمن نفسه" t). وسنصطلح على تسمية هذه المستويات ***فضاءات S***

التزامنية. وعندما ننتقل إلى راصد آخر M، يجب أن نحرك هـذه الطائفـة الأولى مـن الفضـاءات التزامنية بحركة بوانكاريه إلى أن تصبح طائفة جديدة هي فضاءات M التزامنيـة[17]. ولنلاحـظ أن هذه الفضاءات الأخيرة تبدو مائلة جداً في الشـكل 5-21. أمـا إذا فكرنـا بحسـب حركـات الأجسام الصلبة في الهندسة الإقليدية فقد يبدو هذا الميلان في الاتجاه الخطـأ، ولكنـه هـو مـايجب توقعه في الحالة المنكوفسكية. وبينما يعتقـد S ان جميـع الحـوادث الواقعـة علـى المسـتوي الـذي معادلته t = ثابت هي حوادث متزامنة، يكـون لـدى M رأي مختلـف: إذ إن الحـوادث الواقعـة على كل فضاء من فضاءية التزامنيين المائلين هي التي تبـدو لـه متزامنـة! فالهندسـة المنكوفسـكية لاتقدم بذاتها مفهوماً واحداً "للتزامن"، بل إن كـل راصـد يتحـرك حركـة منتظمـة يحمـل معـه فكرته الخاصة عما يعنيه "التزامن".

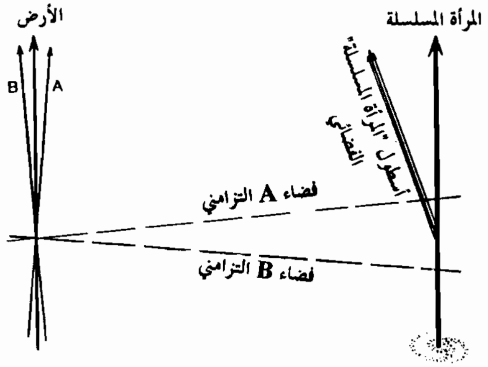


الشكل 5-20: حركة بوانكاريه في زمكان ذي بعدين.



الشـكل 5-21: حركـة بوانكاريـه في زمكان ثلاثي الأبعـاد. ويصف المخطط الأيسر الفضاءات المتزامنـة بالنسبة إلى الراصد S، والمخطط الأيمن الفضاءات المتزامنة بالنسبة إلى M. ولنلاحظ أن S يعتقد أن R يسبق Q (أي يحدث قبله)، في حين أن M يعتقد أن Q يسبق R (ننظر إلى الحركة هنا بأنها سلبية، بمعنى أنها لاتترك أثراً إلا في اختلاف الأوصاف التي يطلقها الراصدان S و M على زمكان واحد معين لاغير.)

لننظر إلى الحادثتين R و Q في الشكل 5-21، حيث يبدو أن الحادث R يقع في نظر S قبل Q، لأن R يقع في فضاء تزامني سبق Q. أما في نظر M، فالوضع بعكس السابق، وتقع Q في فضاء تزامني سبق R. وهكذا، يقع الحادث R بالنسبة لأحد الراصدين قبل Q، أما بالنسبة لآخر فيقع بعده (ولايمكن أن يقع ذلك إلا بسبب أن R و Q هما، كما يقال، مفصولين أحدهما عن الآخر بمسافة من النوع *المكاني*، الأمر الذي يقصد منه أن كلاً منهما يقع خارج مخروط الضوء للآخر. لذلك لايمكن لجسيم مادي أو لفوتون أن يرحل من أحدهما إلى الآخر). وحتى في حالة سرعات بطيئة جداً نسبياً، يمكن أن تحدث هذه الخلافات في الترتيب الزمني بين حوادث تفصل بينها مسافات شاسعة. فإذا كان هناك شخصان يسيران ببطء في الطريق ومر أحدهما بجانب الآخر فإن الحوادث التي تقع في مجرة المرأة المسلسلة Andromeda (وهي أقرب مجرة ضخمة إلى مجرتنا درب التبانة، فبعدها عنا يقرب من 000 000 000 000 000 000 20 كم، وهي الحوادث التي يحكم الشخصان بأنها متزامنة مع لحظة مرور أحدهما بجانب الآخر، هذه الحوادث يمكن أن يبلغ الفرق الزمني بينها عدة أيام. (أنظر الشكل 5-22). فعند أحد الشخصين، يكون الأسطول الفضائي الذي أطلق بقصد إزالة الحياة على الأرض قد أصبح في طريقه إليها. بينما لايكون القرار نفسه بشأن إطلاق الأسطول أو عدمه قد اتخذ بالنسبة للآخر.



الشكل 5-22: الشخصان A و B يسيران ببطء ويمر أحدهما بالآخر. ولكن لديهما نظرتان مختلفتان بشأن انطلاق الاسطول الفضائي من مجرة المرأة المسلسلة في لحظة تلاقيهما [فهي قد أقلعت بالنسبة إلى A ولكن ليس بعد بالنسبة إلى B].

نسبية أينشتين العامة

كانت بصيرة غاليليه الرائعة قد هدته فيما نذكر إلى أن الأجسام تسقط كلها معاً بسرعة واحدة على الأرض (وقد عرف ذلك ببصيرته النافذة وليس نتيجة ملاحظته المباشرة، لأن الريش والحجارة لايمكن أن تسقط معاً بسبب مقاومة الهواء. ولايمكن أن يتحقق له ذلك إلاّ إذا

أمكن تقليص مقاومة الهواء إلى الصفر، وعندئذ يسقط الريش والحجارة معاً). وقد مرت منذ ذاك ثلاثة قرون قبل أن يتحقق مدلول هذا الإلهام، ويكون حجر الزاوية لنظرية عظيمة هي نظرية أينشتين النسبية العامة – أي ذلك التفسير الخارق للثقالة الذي احتاج لتحقيقه، كما سنرى بعد قليل، إلى ***مفهوم الزمكان المنحني***.

ولكن ماالصلة بين إلهام غاليليه وفكرة "انحناء الزمكان"؟ وكيف أمكن له أن يتحول إلى تلك الفكرة التي تختلف عنه في الظاهر كل الاختلاف والتي لم تكتف بإعادة استنتاج مشروع نيوتن (الذي تتسارع الجسيمات بحسبه تحت تأثير الثقالة) بل أدخلت عليه التحسين، على رغم الدقة الفائقة الموجودة فيه. ثم، أمن الجائز حقاً أن يكون إلهام غاليليه القديم قد احتوى على شيء لم تتضمنه نظرية نيوتن فيما بعد؟

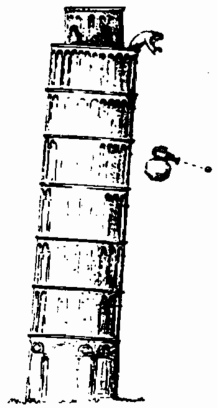
دعونا نبدأ بالإجابة عن السؤال الأخير لأنه الأسهل. ترى ماالذي يحدد تسارع الجسم تحت تأثير الثقالة تبعاً لنظرية نيوتن؟ هناك أولاً تأثير ***قوة*** الثقالة على الجسم، التي نعرف أنها ***تتناسب مع كتلته*** بحسب قانون نيوتن في الجاذبية الثقالية. ثم هناك مقدار التسارع الذي يكتسبه جسم خاضع لقوة ما، فهذا التسارع بحسب قانون نيوتن الثاني ***يتناسب عكساً*** مع كتلة الجسم. والحقيقة التي اهتدى إليها إلهام نيوتن هي أن "الكتلة" التي تظهر في قانون قوة الثقالة ***هي نفسها*** الكتلة في قانون نيوتن الثاني (إذ لايغير من الأمر شيئاً أن يقال "متناسبة" مع، بدلاً من "هي نفسها"). فهذه الحقيقة هي التي تضمن استقلال تسارع الجسم تحت تأثير الثقالة عن كتلة الجسم، مع العلم أنه مامن شيء في مشروع نيوتن العام يتطلب أن يكون مفهوما الكتلة هذين متطابقين. ولم يكن هذا التطابق أمراً ***مسلماً*** به إلا عند نيوتن. ومما يلفت النظر هو أن القوى الكهربائية مشابهة تماماً للقوى الثقالية في أنها أيضاً متناسبة عكساً مع مربع المسافة، ولكن القوى الكهربائية متناسبة مع الشحنة الكهربائية، التي تختلف اختلافاً كلياً عن ***الكتلة*** في قانون نيوتن الثاني. ولاينطبق إلهام غاليليه على القوى الكهربائية، لأن الأجسام المشحونة (كهربائياً) التي تترك في حقل كهربائي ***لا*** "تسقط" كلها معاً بالسرعة نفسها.

دعونا ***نسلم*** موقتاً بإلهام غاليليه كما هو – في حالة الحركة تحت تأثير ***الثقالة*** – ولنتساءل ماهي نتائجه. فلنتخيل غاليليه وهو يترك حجرين يسقطان من برج بيزا المائل. فلو كانت هناك آلة تصوير فيديو فوق أحدهما موجهة نحو الآخر، لظهر هذا الأخير في الصورة معلقاً في الفضاء وكأنه ***غير متأثر*** بالثقالة (الشكل 5-23)! الأمر الذي يدل بلاشك على أن الأجسام كلها تسقط بسرعة واحدة تحت تأثير الثقالة.

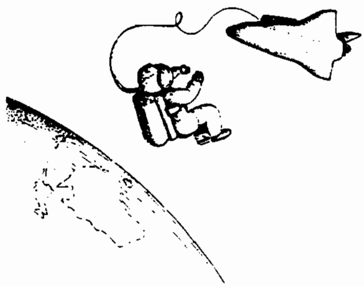
لقد تجاهلنا هنا مقاومة الهواء. لذلك يقدم لنا التحليق في الفضاء وسيلة أفضل لاختبار هذه الأفكار، إذ لاوجود عملياً للهواء في الفضاء. لكن "السقوط" عندئذ يعني مجرد اتباع المدار المناسب تحت تأثير الثقالة. إذ ليس من الضروري أن يكون "السقوط" مستقيماً إلى الأسفل، أي نحو مركز الأرض. فقد تكون هناك كذلك مُرَكّبة أفقية للحركة. فإذا كانت هذه المركّبة

الأفقية كبيرة بصورة كافية كان سقوط الجسم عندئذ دوراناً حول الأرض من دون أن يقترب منها أبداً. فالسير في مدار حر تحت تأثير الثقالة، ليس سوى طريقة معقدة (ومكلفة جداً) "للسقوط". ولايختلف الأمر في هذه الحالة أبداً عن صورة آلة التصوير الفيديو المذكورة أعلاه، إذ يرى رائد الفضاء مركبته الفضائية عائمة أمامه في أثناء "سيره الفضائي" وكأنها غير متأثرة بقوة الثقالة التي تؤثر بها كتلة الكرة الأرضية الهائلة تحتها (أنظر الشكل 5-24) وهكذا نستطيع أن نلغي محلياً تأثيرات الثقالة بالانتقال إلى "هيكل الإسناد المتسارع" المرتبط بالسقوط الحر.

بهذه الطريقة، أي بالسقوط الحر، يمكن *إلغاء* الثقالة، لأن تأثيرات الحقل الثقالي لاتختلف بشيء عن تأثيرات التسارع. فمثلاً، حين تكون داخل مصعد يتسارع نحو الأعلى، تشعر عندئذ بتزايد الحقل الثقالي الظاهري. وإذا كان المصعد يتسارع إلى الأسفل، تشعر عندئذ بتناقصه. أما إذا انقطع حبل تعليق المصعد (وأهملنا مقاومة الهواء وتأثير الاحتكاك) عندئذ يلغي التسارع الناتج نحو الأسفل تأثير الثقالة نهائياً. ويبدو ركاب المصعد عائمين بحرية - مثل رائد الفضاء أعلاه - إلى أن يصطدم المصعد بالأرض! حتى أن تسارعات القطار أو الطائرة يمكن أن تجعل إحساس الراكب حيال شدة الثقالة واتجاهها، غير متطابقة مع ماتوحي له به الرؤية العيانية المعتادة التي يحدد بها أين يجب أن يكون "الأسفل"؟ ذلك لأن تأثيرات التسارع وتأثيرات الثقالة تشبه إحداهما الأخرى كل الشبه. وهذه الحقيقة (اي كون تأثيرات الثقالة مكافئة لتأثيرات هيكل الإسناد المتسارع) هي ماسماه أينشتين مبدأالتكافؤ† principle of equivalence



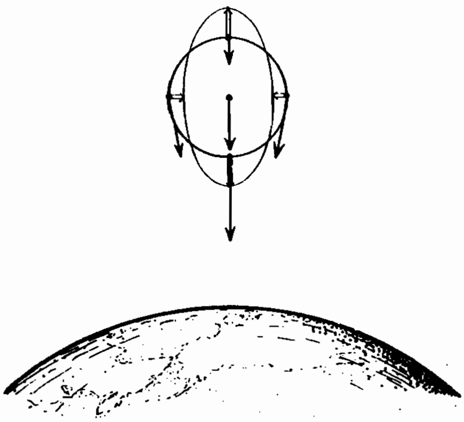
الشكل 5-23: غاليليه يترك حجرين يسقطان (مع آلة تصوير فيديو على أحدهما) من برج بيزا المائل.



الشكل 5-24: يرى رائد الفضاء مركبته الفضائية طافية أمامه وكأنها غير متأثرة بالثقالة.

† تعود هذه التسمية إلى ماخ Ernst Mach (1838-1916) قبل أينشتين بأكثر من عشرين عاماً. وقد استخدمها بوانكاريه بعده في كتابة "العلم والفرضية" طبعة عام 1906.

كل ماقيل حتى الآن هو "محلي". ولكن إذا أتيح للمرء أن يقوم بقياسات على درجة كافية من الدقة (وليست محلية بكل معنى الكلمة)، أمكنه عندئذ، من حيث المبدأ، أن يتحقق وجود ***اختلاف*** بين حقل ثقالي "حقيقي" وتسارع صرف. ولقد بينت في الشكل 5-25 مع شيء من المبالغة، كيف أن الجسيمات التي نظمت في البدء في شكل كروي مستقر، ستبدأ عند سقوطها سقوطاً حراً تحت تأثير الثقالة بالتأثر من ***عدم انتظام*** الحقل الثقالي (النيوتني). ويرجع عدم الانتظام هذا لسببين، أولهما، لأن مركز الأرض يبعد مسافة منتهية، عن الجسيمات، مما يجعل الجسيمات الأقرب إلى سطح الأرض ذات تسارع إلى الأسفل أكبر من تسارع الجسيمات الأعلى منها (تبعاً لقانون التربيع العكسي). وثانيهما، لأن هناك (بسبب أن بعد مركز الأرض عن الجسيمات منته)، اختلافات طفيفة في ***منحى*** هذا التسارع بالنسبة لمختلف الإزاحات الأفقية للجسيمات عن المحور الواصل بين مركز الأرض ومركز كرة الجسيمات. وهكذا يؤدي عدم الانتظام هذا إلى تشوه الشكل الكروي تشوهاً طفيفاً يتحول فيه إلى "مجسم قطع ناقص". إذ تتطاول الكرة في اتجاه مركز الأرض (وكذلك في الاتجاه المقابل) لأن الأجزاء الأقرب إلى المركز تعاني تسارعاً أكبر قليلاً من الأجزاء الأبعد، فيضيق الشكل الكروي في الاتجاهات الأفقية نتيجة لكون تسارعات الجسيمات غير الواقعة على المحور الشاقولي تكون مائلة عليه ميلاً طفيفاً عند اتجاهها نحو مركز الأرض.

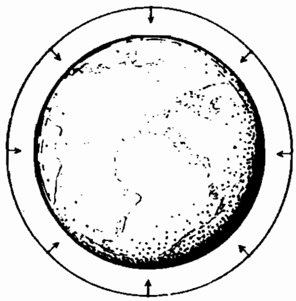


الشكل 5-25: الأثر المدي. تبين الأسهم المزدوجة التسارع النسبي الذي نسميه ويل WEYL

ويعرف هذا الأثر التشوهي باسم الأثر ***المدي*** الثقالي tidal effect of gravity. فإذا استبدل مركز القمر بمركز الأرض، وسطح الأرض بكرة الجسيمات، نجد عندئذٍ بالضبط تفسير تأثير القمر في رفع المد على الأرض، فيحدث انتفاخان على كلا الطرفين: في الاتجاه نحو القمر وفي

المقابل له. وهذا الأثر المدي هو ظاهرة عامة للحقل الثقالي، ولايمكن "حذفه" بالسقوط الحر، وهو يشكل مقياساً لعدم انتظام حقل الثقالة النيوتني. (والحقيقة، أن مقدار التشوه المدي يتناقص مع مقلوب **مكعب** المسافة عن مركز الجذب وليس مع مقلوب مربعها).

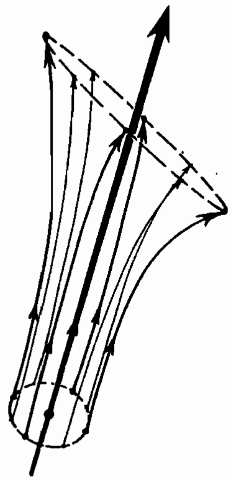
ولقد تبين أن من الممكن التعبير عن قانون التربيع العكسي بطريقة بسيطة بدلالة هذا الأثر المدي، وهي أن **حجم** مجسم القطع الناقص الذي تحولت الكرة الابتدائية إليه عند تشوهها[18] ***يساوي*** حجم الكرة الأصلية – بفرض أن الكرة كانت تحيط بفراغ. وهذه خاصة حجمية لاتصح في أي قانون آخر للقوة غير قانون التربيع العكسي. أما إذا فرضنا أن الكرة لاتحيط بفراغ، وإنما بمادة ما كتلتها الكلية M، عندئذ توجد في هذه الحالة مركبة إضافية للتسارع متجهة إلى الداخل وناشئة عن الجذب الثقالي لهذه المادة. ***فينكمش*** حجم مجسم القطع الناقص الذي تحولت إليه مبدئياً كرة الجسيمات – والحقيقة أنها تنكمش بمقدار ***يتناسب*** مع M. ويمكن أن يظهر أثر نقصان الحجم مثلاً فيما لو اعتبرنا كرتنا محيطة بالأرض على ارتفاع ثابت (الشكل 5-26). ففي هذه الحالة يكون التسارع المتجه إلى أسفل (أي إلى الداخل) والناشئ عن ثقالة الأرض هو الذي يسبب نقصان حجم كرتنا. فخاصة نقصان الحجم هذه هي التي تشير إلى ما لم نذكره بعد عن قانون نيوتن الذي يعطي قوة الثقالة، وهو أن هذه القوة تتناسب مع كتلة ***الجسم الجاذب***.



الشكل 5-26: حين تحيط الكرة بمادة ما (هي هنا الأرض)، عندئذ يوجد تسارع صافي متجه إلى الداخل نسميه ريتشي RICCI.

لنحاول الحصول على تمثيل زمكاني لهذا الوضع. ففي الشكل 5-27 رسمت الخطوط الكونية لجسيمات سطحنا الكروي (الذي مثلناه بدائرة في الشكل 5-25)، وقد تم هذا التمثيل في هيكل إسناد تظهر فيه النقطة الممثلة لمركز الكرة في حالة سكون "سقوط حر". فوجهة نظر النسبية العامة هي أن تنظر إلى حركات السقوط الحر على أنها "حركات طبيعية" – أي أنها مثيلات

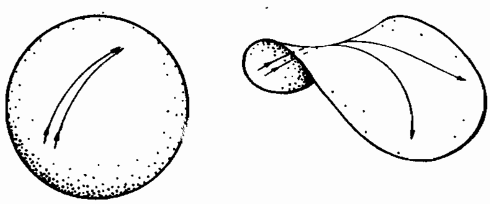
"الحركة المستقيمة المنتظمة" التي نعرفها في الفيزياء الخالية من الثقالة. لذلك ***نحاول*** أن نتصور السقوط الحر ممثلاً بخطوط كونية "مستقيمة" في الزمكان، وإن كان المرء قد يختلط عليه الأمر عند النظر إلى الشكل 5-27 بسبب استخدام ***كلمة*** "مستقيم" لهذا الخط، ولذلك سندعو الخطوط الكونية للجسيمات الساقطة سقوطاً حراً، الخطوط/***الجيودزية*** geodesics في الزمكان على سبيل الاصطلاح.



الشكل 5-27: انحناء الزمكان: وصف الأثر المدي في الزمكان.

ولكن هل هذا اصطلاح جيد؟ ثم ماالمقصود عادة من "خط جيوديزي"؟ سيتضح لنا ذلك من النظر إلى شيء مماثل نجده في حالة سطح منحن ذي بعدين. فالخطوط الجيوديزية على هذا السطح هي "المنحنيات" التي تمثل (محلياً) "أقصر الطرق". لذلك، إذا تصورنا قطعة وتر مشدودة على السطح (على ألاّ تكون طويلة لئلا تنزلق) فإن هذه القطعة ستنطبق على أحد الخطوط الجيوديزية على السطح. وقد صورت في الشكل 5-28 أمثلة على سطحين، يمثل الأيسر منهما مايسمى "الموجب الانحناء" (مثل سطح كرة). والثاني مايسمى "السالب الانحناء" (ويشبه سطح السرج). والخطان الجيوديزيان المتجاوران على السطح الموجب الانحناء، اللذان ينطلقان كأنهما متوازيين، يبدأ أحدهما، عند متابعة سيرهما، بالانثناء ***مقترباً*** من الآخر، أما في حالة السطح السالب الانحناء فإن أحدهما يبدأ بالانثناء ***مبتعداً عن*** الآخر. وإذا تخيلنا أن الخطوط الكونية لسقوط الجسيمات الحر لها شكل خطوط جيوديزية على سطح معين، نرى عندئذ أن هناك وجه شبه قوي بين الأثر المدي الثقالي الذي تحدثنا عنه قبل قليل، والآثار الناتجة عن انحناء

السطح – ولكن أثري الانحناءين الموجب والسالب موجودان ***معاً*** في حالة المد الثقالي. لنتأمل الشكلين 5-25 و 5-27، سنرى أن الخطوط الكونية في زمكاننا، تأخذ ***بالابتعاد*** أحدها عن الآخر في اتجاه واحد (حين تكون موازية للاتجاه نحو الأرض) – كما في حالة السطح ***السالب*** الانحناء في الشكل 5-28 – كما يأخذ أحدها ***بالاقتراب*** من الآخر في الاتجاهات الأخرى (حين تنزاح أفقياً بالنسبة للأرض) – كما في حالة السطح ***الموجب*** الانحناء في الشكل 5-28. وهكذا يبدو زمكاننا فعلاً بأن فيه انحناء مماثلاً لنوعي سطوح الشكل 5-28، ولكنه أكثر تعقيداً بسبب عدد أبعاده المرتفع بحيث يوجد خليط من الانحناءات الموجبة والسالبة.

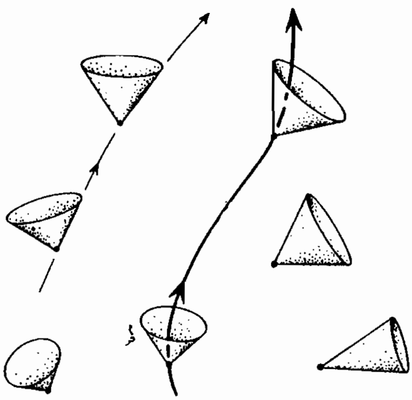


الشكل 5-28: تتقارب الخطوط الجيوديزية على السطح إذا كان انحناؤه موجباً، وتتباعد إذا كان انحناؤه سالباً.

يتضح من ذلك كيف يمكن استخدام مفهوم انحناء الزمكان في وصف تأثير الحقول الثقالية، علماً أن هذا الوصف تنبع إمكانية استخدامه أساساً من إلهام غاليليه (أي من مبدأ التكافؤ)، ويسمح لنا بالتخلص من "قوة" الثقالة بالسقوط سقوطاً حراً. والحقيقة أنه مامن شيء قلته إلى الآن يفرض علينا المضي إلى أبعد من نظرية نيوتن. بل كل مافي الأمر هو أن هذه الصورة الجديدة تتيح لنا ***إعادة صياغة*** هذه النظرية[19]. بالفعل: فحين نجرب تركيب هذه الصورة مع ماتعلمناه من عرض منكوفسكي ***للنسبية الخاصة*** – أي هندسة الزمكان التي نعرف الآن أنها تطبق في حال عدم وجود ثقالة – تظهر عندئذ فيزياء جديدة، والتركيب الناتج هو ***نسبية أينشتين العامة***.

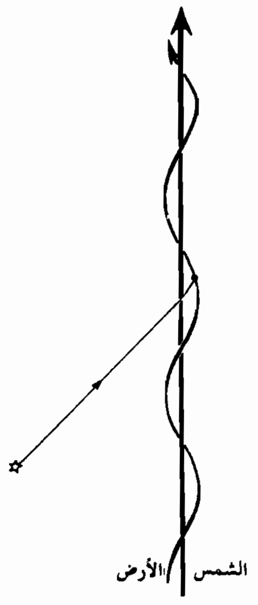
دعونا إذن نتذكر ماتعلمناه من منكوفسكي. لدينا (في حال غياب الثقالة) زمكان يُعرَّف فيه قياس "المسافة" بين نقطتين تعريفاً خاصاً ينص على مايلي: إذا كان لدينا خط كوني في الزمكان يصف تاريخ جسيم ما، يكون قياس "المسافة" المنكوفسكية عندئذ على الخط الكوني هو ***الزمن*** الذي قضاه الجسيم فعلاً (والحقيقة أننا لم ننظر فيما سبق إلا في "المسافات" على طول الخطوط الكونية المكونة من قطع مستقيمة، ولكن هذا التعريف ينطبق أيضاً على الخطوط

الكونية المنحنية، التي تقاس "المسافة" عليها على طول المنحني)، باعتبار أن هندسة منكوفسكي صحيحة إذا لم يكن ثمة حقل ثقالي، أي لم يكن ثمة انحناء في الزمكان. أما في حال وجود ثقالة، فعندئذ نستطيع أن ننظر إلى هندسة منكوفسكي بأنها تقريبية فقط، أي بالطريقة نفسها التي يقدم لنا فيها السطح المستوي وصفاً تقريبياً فحسب لهندسة السطح المنحني. ولبيان ذلك لنتخيل أننا استعنا بمجهر أخذنا نزيد من قوته لفحص سطح منحنٍ، فبدأت هندسة السطح تتسع وتزداد مسافاتها، وعندئذ سنجد أن السطح أخذ يبدو أكثر استواء (وتسطحاً). لذلك نقول إن السطح المنحني يشبه المستوي الإقليدي ***محلياً*** (أو موضعياً)[20]. وهكذا نستطيع أن نقول بالطريقة نفسها إن هندسة الزمكان في حال وجود ثقالة، هي محلياً مثل هندسة منكوفسكي (التي هي هندسة ***زمكان مسطح***) وبصورة خاصة إن كل نقطة من الزمكان هي رأس ***مخروط ضوئي***، كما هو الحال في فضاء منكوفسكي، ولكن هذه المخاريط الضوئية ليست في نسق منظم كل الانتظام كما هو الحال في فضاء منكوفسكي، الأمر الذي سنرى في الفصل السابع بعض الأمثلة عنه، أي نماذج عن هذا الزمكان، يتضح فيها عدم الانتظام (ارجع إلى الشكلين 7-13 و 7-14 في الصفحة 395). ولنلاحظ أن خطوط الكون للجسيمات المادية، هي منحنيات تتجه دوماً إلى ***داخل*** المخاريط الضوئية، أما خطوط الكون للفوتونات فهي منحنيات تأخذ اتجاهها على سطوح هذه المخاريط. وفي جميع الأحوال، يوجد على أي منحني كان مفهومٌ منكوفسكيٌّ "للمسافة"، يقيس، كما هو الحال في فضاء منكوفسكي، الزمن الفعلي الذي قضاه الجسيم. ومن الطبيعي أن قياس المسافة هنا، يُعرِّف، كما هو الحال في أي سطح منحنٍ، هندسة هذا السطح، التي قد تختلف عن هندسة السطح المستوي.



الشكل 5-29: صورة زمكان منحن

وهكذا أصبح من الممكن بعد ماتقدم إعطاء الخطوط الجيوديزية في الزمكان تأويلاً مماثلاً لتأويلها في حالة السطوح ذات البعدين التي رأيناها سابقاً، مع الانتباه دائماً إلى الفروق بين الفضائين المنكوفسكي والإقليدي. فبدلاً من أن تكون الخطوط الجيوديزية هي تلك التي أطوالها أصغر مايمكن (محلياً) تكون الخطوط الكونية الجيوديزية في الزمكان هي المنحنيات التي تجعل "المسافات" (أي الأزمنة) عليها (محلياً) ***أعظم مايمكن***. وهذا فعلاً ماتسير وفقه خطوط كون الجسيمات التي تتحرك حرة بتأثير الثقالة. ونخص بالذكر مثلاً أن حركة الأجرام السماوية توصف بهذه الخطوط الجيوديزية. وكذلك أشعة الضوء (أو خطوط كون الفوتونات) في الفضاء الخالي هي أيضاً خطوط جيوديزية، ولكن "طولها" عندئذ هو ***صفر***[21]. وقد أعطيت في الشكل 5-30 مخططاً مبدئياً لخطي كون الأرض والشمس، مراعياً أن حركة الأرض حول الشمس ترسم خطاً جيوديزياً لولبياً حول خط كون الشمس، كما مثلت كذلك فوتوناً يصل الأرض من نجم بعيد. وراعيت أن خط كونه يظهر انحناء خفيفاً نتيجة إلى أن الضوء ينحرف بحسب نظرية أينشتين بتأثير حقل الشمس الثقالي.



الشكل 5-30: خطا كون الأرض والشمس، وشعاع ضوئي يأتي من نجم بعيد إلى الأرض فينحرف بتأثير حقل الشمس الثقالي.

بقي علينا أيضاً أن نرى كيف يمكن أن ينضوي قانون التربيع العكسي (الذي اكتشفه نيوتن) في نسبية أينشتين، وكيف ينبغي أن يعدل وفقاً لها. فلنعد إلى مثالنا حول كرة الجسيمات التي نتركها لتسقط في حقل ثقالة، ولنتذكر أن الكرة التي تحيط بفراغ فحسب، لايتغير حجمها مبدئياً بحسب نيوتن، أما إذا كانت الكرة محيطة بمادة كتلتها الكلية M عندئذ تعاني انكماشاً متناسباً مع M. فهذه القواعد تظل هي نفسها في نظرية أينشتين (في حال كرة صغيرة)، ماعدا أن الكتلة M ليست هي بالتحديد التي تحدد تغير الحجم، وإنما هناك مساهمة إضافية (ضئيلة جداً عموماً) من ***الضغط*** في المادة المحاطة بالكرة.

أما التعبير الرياضي الكامل عن الانحناء في الزمكان الرباعي الأبعاد فيعبر عنه كائن رياضي ***يدعى موتّر الانحناء الريماني*** **Riemann curvature tensor** (أي الانحناء الذي يجب أن يعبر عن الآثار المدية في حال جسيمات تتحرك في أي اتجاه ممكن وعند أي نقطة كانت). وهذا الموتّر هو كائن معقد إلى حد ما، فهو يحتاج لتعيينه عند كل نقطة إلى عشرين عدداً حقيقياً تسمى ***مركبات*** الموتّر تشير بمختلفها إلى الانحناءات المختلفة في الاتجاهات المختلفة في الزمكان. ويكتب موتّر الانحناء الريماني عادة R_{ijkl} ولكني لاأود في الحقيقة أن أشرح هنا معاني هذه الأحرف الصغيرة المكتوبة تحت الحرف R (كما لاأود في الحقيقة أن أشرح ***ماهو*** الموتّر فعلاً) لذلك سأكتب موتّر الانحناء الريماني هذا بالصورة:

RIEMANN

وتوجد طريقة يمكن أن يشطر بها هذا الموتر إلى قسمين يدعيان موتّر ويل **Weyl tensor** وموتّر ريتشي **Ricci tensor** (ويحوي كل منهما عشر مركبات) وسأعبر عن هذا التقسيم رمزياً بالمعادلة:

RIEMANN = WEYL + RICCI

(إذ إن التعابير المفصلة ليس فيها فائدة خاصة لنا هنا). إن الموتر ويل **Weyl** هو الذي يقيس التشوه المدّي **tidal distortion** الابتدائي لكرتنا المؤلفة من جسيمات تسقط حرة (أعني التغير الأولي في الشكل وليس في الحجم). أما الموتر ريتشي **RICCI** فيقيس ***تغير حجم*** هذه الكرة الابتدائي(22). ولنتذكر هنا أن نظرية نيوتن في الثقالة تقتضي أن تكون ***الكتلة*** المحاطة بالكرة الساقطة متناسبة مع هذا النقصان الابتدائي في الحجم، الأمر الذي يعني لنا، إذا لم نتوخ الدقة، أن كثافة ***كتلة*** المادة – أو كثافة ***الطاقة*** المكافئة لها (لأن $E = mc^2$) – يجب أن ***تساوي*** موتّر ريتشي.

والحقيقة أن هذه المساواة هي ماتؤكده فعلاً معادلات الحقل في النسبية العامة، أعني ***معادلات الحقل الأينشتيني***(23). على أن هناك تقنيات تتعلق بهذه الأمور يحسن بنا هنا ألا

نتورط بها، بل يكفي أن نقول إن هناك شيئاً يدعى موتر ***الطاقة – الاندفاع***، وهـذا الموتـر هـو الـذي يؤلـف بـين جميـع المعلومـات الخاصـة المتعلقـة بطاقـة وضغـط واندفـاع المـادة والحقـول الكهرطيسية، وسنشير إليه بالكلمة ENERGY. وعندئذ تصبح معادلات أينشتين بهـذه الرمـوز الأولية العامة جداً:

RICCI = ENERGY

(إن وجود "الضغط" في الموتر ENERGY مع بعـض شـروط الاتسـاق اللازمـة للمعـادلات بمجموعها، هو مايقتضي مساهمة الضغط أيضاً في مفعول الانكماش الحجمي المذكور أعلاه).

يبدو أن هذه المعادلة لاتفيدنا بشيء عن الموتـر WEYL، مـع أنـه كميـة مهمـة، لاسـيما أن المفعول المدي الذي يطبق في الفضاء الفـارغ يحـدث كلـه بسـبب الموتـر WEYL، والحقيقـة أن معـادلات أينشـتين المذكـورة أعـلاه تتطلـب وجـود معـادلات ***تفاضلية*** تربـط بـين الموتريـن WEYL و ENERGY، وهي أشـبه بمعـادلات مكسـويل الـتي صادفناهـا سـابقاً[24] (ص 231) ولذلك كان من المفيد فعلاً الأخـذ بوجهـة النظـر القائلـة إن WEYL هـو محـاكٍ ثقـالي للكميـة المدعوة حقل كهرطيسي، والتي يُشار إليها بالثنائية) $\vec{E}$, $\vec{B}$ ((وهـي في الحقيقـة، موتـر أيضـاً يسمى موتّر مكسويل). فالموتر WEYL في الحقيقة، هو الذي، يقيس، بمعنى ما، الحقل ***الثقـالي***. ويرجع "منشؤه" إلى الموتر ENERGY، الأمر الذي يماثل كون الحقل الكهرطيسـي ($\vec{E}$, $\vec{B}$) منشـؤه ρ , $\vec{J}$) أي مجموعـة الشـحنات والتيارات في نظريـة مكسويـل، وهــذه وجهـة نظـر سنسـتفيد منهـا في الفصل السابع.

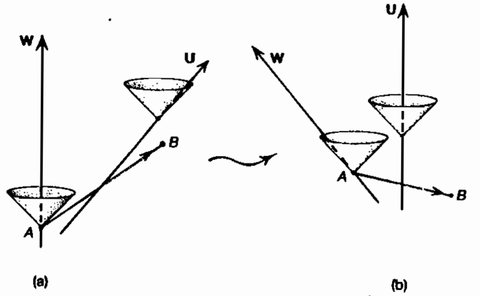
وحين نأخذ في اعتبارنا تلك الفروق المذهلة بين نظرية أينشتين والنظرية التي تقدم بها نيوتن قبله بقرنين سواء في الصياغة أم في الأفكار الأساسية، عندئذ ستدهشنا صعوبة الكشف عـن حقـائق تجريبية تظهر هـذه الفـروق بـين النظريتـين. ولكـن، حـين تتنـاول ملاحظاتنـا سـرعات صغـيرة بالمقارنة مع سرعة الضوء c، وحقولاً ثقالية ليست على درجة كافية من القوة (مما يجعـل سـرعة الإفلات صغيرة بالنسبة إلى c، راجع الفصل السابع، ص394) عندئذ تعطي نظرية أينشتين نتائج مطابقة عملياً لنتائج نيوتن، علماً أن نظرية أينشتين هي الأكثر دقة في المواقف التي تختلـف فيهـا توقعات النظريتين ***فعلاً***. وهناك الآن العديد من هذه الاختبارات التجريبية الدامغة الـتي صدقـت فيها نظرية أينشتين الأحدث كل الصدق. فالساعات تصبح أبطأ بقليل جداً في الحقـل الثقـالي، بحسب ما تنبأ أينشتين.

وقد قيس هذا الأثر اليوم مباشـرة بطـرق متعـددة. كمـا أن الإشـارات الضوئيـة والراديويـة تحرفها الشـمس فعلاً فتتأخـر قليلاً عند المرور بجانبها – وهـذا أيضـاً من نتائـج النسـبية العامة التي

أختبرت اختباراً جيداً. وتحتاج المسابر الفضائية والكواكب بحسب نظرية أينشتين، إجراء تصحيح طفيف في مساراتها النيوتنية. الأمر الذي تحقق أيضاً بالتجربة (ونخص بالذكر عدم الانتظام في حركة الكوكب عطارد الذي عرف باسم "تقدم نقطة الحضيض" perihelion advance [وهي أقرب نقطة في مسار الكوكب إلى الشمس]، والتي كانت قد شغلت الفلكيين منذ عام 1859، ثم فسرها أينشتين عام 1915). وربما كانت أبلغ المشاهدات التي اتفقت اتفاقاً شديداً مع نظرية أينشتين، هي التي تناولت منظومة نجمية تدعى ***النّباض الثنائي*** **binary pulsar** المؤلف من نجمين صغيرين جداً لكن كتلتيهما كبيرتان جداً (وهما على الأرجح نجمان نترونيان. راجع الصفحة 393). وقد حققت هذه المشاهدات أيضاً بصورة غير مباشرة نتيجة ليس لها وجود إطلاقاً في نظرية نيوتن، وهي إصدار ***الموجات الثقالية*** (والموجات الثقالية هي المماثل الثقالي للموجات الكهرطيسية، كما تسير مثلها بسرعة الضوء c). ولاتوجد مشاهدات مثبتة تتعارض مع نسبية أينشتين العامة. فهي على الرغم من كل غرابتها لأول وهلة، أصبحت تشكل جزءاً من علمنا.

السببية النسبوية والحتمية

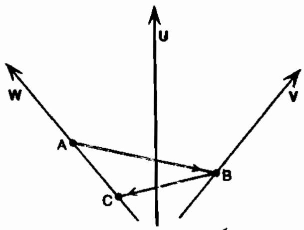
إن الأجسام المادية كما نذكر، لايمكن أن تكون، بحسب النظرية النسبية، أسرع من الضوء في سيرها-بمعنى أن خطوطها الكونية يجب أن تقع دوماً داخل مخاريط الضوء (أنظر الشكل 5-29). (لذلك نحتاج في النسبية العامة، بوجه خاص، إلى تحديد حالة الأشياء بهذه الطريقة المحلية. لأن مخاريط الضوء ليست موزعة بانتظام، فلامعنى إذن لتساؤلنا هل أن سرعة الجسيم ***البعيد*** جداً تفوق سرعة الضوء ***هنا*** أم لا). فالخطوط الكونية للفوتونات تقع ***على سطوح المخاريط*** الضوئية، ولكن لايجوز لأي جسيم أن يقع خط كونه ***خارج*** المخاريط. أو في الحقيقة، يجب أن نعتمد الآن صيغة أعم، فنقول لايجوز ***لإشارة*** أن تسير خارج مخروط الضوء.



الشكل 5-31: تبدو الإشارة (B مثلاً) الأسرع بالنسبة للراصد W من الضوء، أنها ترجع في الزمن إلى الوراء بالنسبة للراصد U. والشكل الأيمن (b) ليس إلا الشكل الأيسر (a) نفسه إنما مرسوم من وجهة نظر الراصد U (وإعادة الرسم هذه يمكن إنجازها بحسب حركة بوانكاريه. قارن مع الشكل 5-21 - ولكن التحول هنا من (a) إلى (b) يجب أن يؤخذ بمعنى *إيجابي* لابمعنى سلبي).

ولكي ندرك سبب ذلك دعونا نعود إلى تصورنا لفضاء منكوفسكي (الشكل 5-31). ولنفرض أن هناك آلة جهزت لإرسال إشارات أسرع قليلاً من الضوء. فالراصد W يستطيع أن يرسل، باستخدام هذه الآلة، إشارة من الحادث A الواقع على خط كونه إلى حادث B بعيد عنه، ويقع بالضبط تحت مخروط الضوء للحادث A. وقد مثلنا هذا الإرسال في الشكل (b) 5-31 فقد أعدنا رسمه من وجهة نظر الراصد الثاني U الذي يبتعد بسرعة عن W (بدءاً من نقطة تقع مثلاً بين A و B)، والذي يبدو أن الحادث B قد حدث بالنسبة له *قبل* الحادث A (إن "إعادة هذا الرسم" هي حركة بوانكاريه، كما سبق شرحها ص 246). إن الفضاءات المتزامنة للراصد U تبدو من وجهة نظر W "مائلة" الأمر الذي يعطي السبب في أن الحادث B قد يبدو لِ U قبل A. وهكذا يبدو بالنسبة إلى U أن الإشارة المرسلة من W ترجع في الزمن إلى الوراء!

وعلى رغم ذلك ليس هذا بعد وجه التناقض، وإنما، إذا فرضنا وجود راصد *ثالث* V مناظر لِ W من وجهة نظر U (بحسب مبدأ النسبية الخاصة) ويبتعد عن U في الاتجاه المعاكس لِ W، وكان مجهزاً أيضاً بآلة ترسل، من وجهة نظره، إلى الخلف في اتجاه U إشارات أسرع قليلاً من الضوء. فإن هذه الإشارات سيبدو أيضاً لِ U أنها ترجع في الزمن إلى الخلف، ولكن في الاتجاه المكاني المعاكس (أي من اليمين إلى اليسار بحسب الشكل) في هذه المرة. فالراصد V يستطيع أن ينقل هذه الإشارة الثانية باتجاه العودة إلى W في اللحظة نفسها التي يتلقى فيها عند الحادث (B) الإشارة الأولى التي أرسلها W. فهذه الإشارة تصل إلى W عند الحادث C الذي يسبق من وجهة نظر U حادث الإرسال A للإشارة الأصلية (الشكل 5-32). ولكن الأسوأ من ذلك، أن الحادث C وقع في الحقيقة قبل حادث إرسال الإشارة الأصلية عند A، الواقع على الخط *الكوني الخاص* بِ W. فالراصد W *يشهد* وقوع الحادث C قبل أن يصدر هو إشارته عند A! ولكن الرسالة التي يعيدها الراصد V إلى W يمكن أن تكون، بحسب تدبير مسبق مع W، مجرد إعادة للرسالة التي يتلقاها عند B. وهكذا يمكن أن يتلقى W في وقت سابق (بالنسبة إلى خط كونه) الرسالة نفسها التي سيرسلها فيما بعد! كما يمكن أن نجعل وقت تلقي الرسالة أبكر من وقت إرسالها بقدر مانشاء، وذلك بجعل المسافة بين الراصدين V و W أكبر. ثم إنه ربما كانت رسالة W الأصلية هي كسر رجله، فهو إذن يستطيع تلقي هذه الرسالة *قبل* وقوع الحادث وعندئذ من المفروض أن يأخذ بملء إرادته الحرة إحتياطاته لكي يتجنبه!

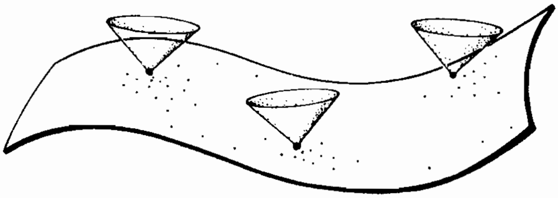


الشكل 5-32: إذا كان الراصد V مزوداً بآلة كالتي عند W وترسل إشارات أسرع من الضوء ولكن في الاتجاه المعاكس، فالراصد W يستطيع أن يستخدمها لإرسال رسالة إلى ماضيه الخاص!

وهكذا نخلص إلى أن إرسال إشارات أسرع من الضوء لايتسق مع مبدأ أينشتين النسبوي، لأنهما يؤديان معاً إلى تناقض صارخ مع مشاعرنا الطبيعية بحرية الإرادة. بل إن الموضوع في حقيقة الأمر أخطر من ذلك، لأننا نستطيع أن نتصور أن الراصد W ربما كان مجرد آلة ميكانيكية سبق أن برمجت لكي ترسل إشارة *"نعم"* إذا تلقت *"لا"* و "لا" إذا تلقت "نعم". والراصد V يمكن في الحقيقة أن يكون أيضاً آلة ميكانيكية ولكنها مبرمجة لكي ترد بـ "لا" إذا تلقت "لا" وبـ "نعم" إذا تلقت "نعم". الأمر الذي يؤدي إلى أن التناقض الأساسي هو نفسه† (25)، وأن لافرق إذا كان الراصد له "حرية إرادة" أو لا، وأن الآلة التي ترسل إشارات أسرع من الضوء "لايمكن" أن تكون آلة فيزيائية محتملة. وتلك مسألة تحمل بالنسبة لنا بعض المضامين المحيرة (الفصل السادس ص 340) فدعونا نسلم بأن الإشارة مهما كان نوعها – وليس فحسب تلك التي تحملها الجسيمات الفيزيائية العادية – يجب أن تكون مقيدة بشرط مخروط الضوء. وقد اعتمدنا، في الحقيقة، في إثبات الحجة السابقة على النسبية *الخاصة*، ولكن قواعد هذه النظرية **الخاصة** تظل سارية محلياً أيضاً في النسبية العامة، الأمر الذي يبرر قولنا إن جميع الإشارات تلتزم [محلياً] بشرط مخروط الضوء، وهذا مايجب أن ينطبق إذن على النسبية العامة، وسوف نرى الآن كيف يؤثر هذا الشرط في مسألة *الحتمية* في النظريات النسبية. "فالحتمية"، كما نذكر، تعني في المشروع النيوتني (أو الهاملتوني إلخ) ***أن البيانات الابتدائية في لحظة معينة*** (خاصة) تحدد السلوك تحديداً تاماً في أي زمن آخر. بالفعل، إذا أخذنا بفكرة التمثيل الزمكاني في النظرية النيوتنية، عندئذ ستكون "اللحظة الخاصة" التي نحدد فيها البيانات [الابتدائية] من وجهة النظرية النيوتنية هي مقطع ثلاثي الأبعاد في الزمكان الرباعي الأبعاد (أعني المكان بكامله في هذه اللحظة الخاصة) ولكن لايوجد في النظرية النسبية مفهوم شامل واحد "للزمن" يمكن أن نخص به هذه الشريحة، وإنما الطريقة المألوفة هي أن نتبنى وضعاً أكثر ليونة، فيتبنى كل امرئ "زمناً خاصاً" به. وهكذا يمكن أن يتخذ المرء الفضاء التزامني لراصد ما لكي يحدد عليه بياناته الابتدائية بدلاً من "المقطع" المذكور أعلاه. ولكن مفهوم "الفضاء التزامني" ليس له [أيضاً] في النسبية العامة تعريف محدد واضح، لذلك يمكن للمرء أن يستخدم بدلاً عنه المفهوم الأعم وهو مفهوم *"السطح الشبيه بالمكان"* spacelike surface (26). وقد مثلنا سطحاً كهذا في الشكل 5-33، وهذا السطح يتميز بأنه يقع بأكمله خارج مخروط الضوء الخاص بأي نقطة من نقاطه، فهو محلياً أشبه بالفضاء التزامني.

---

† لأن الآلة W ستتلقى الرد "لا" على رسالتها "لا" قبل إرسالها وبذلك سترد بـ "نعم" بدلاً من "لا" في المستقبل وبذلك تكون الآلة V قد ردت بـ "لا" و "نعم" على الرسالة نفسها.



الشكل 5-33: سطح شبيه بالمكان يتخذ لتحديد البيانات الابتدائية في النسبية العامة.

(يجب أن نلاحظ أن هذا السطح في الحقيقة هو ثلاثي الأبعاد).

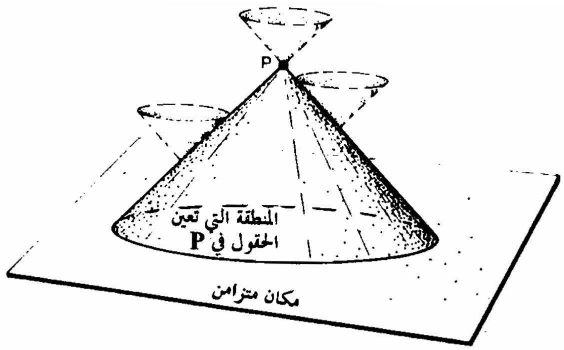
يمكن أن نعبر عن الحتمية في النسبية الخاصة على النحو التالي: إن معرفة البيانات الابتدائية على أي فضاء تزامني S، تكفي لتعيين السلوك في كامل الزمكان (وهذا ماينطبق بوجه خاص على نظرية مكسويل – التي هي في الحقيقة نظرية "نسبوية خاصة"). على أنه من الممكن إعطاء صيغة أقوى من هذه: إذا أردنا أن نعرف ماالذي سيجري عند حادث معين P واقع في موضع ما في مستقبل الفضاء S، عندئذ يكفي أن نعرف البيانات الابتدائية في منطقة محدودة (منتهية) من S، وليس في S بكامله. والسبب في ذلك أن "المعلومات" لايمكن أن تنتقل بأسرع من الضوء، لذلك، يستحيل على أي نقطة بعيدة بعداً، لايمكن للضوء الصادر عنها أن يصل إلى P إلا بعد حدوث P، أن يكون لها تأثير في P † (أنظر الشكل 5-34)*. وهذه الميزة أكثر إقناعاً بكثير مما كان عليه الحال في النظرية النيوتنية، فهناك يحتاج المرء مبدئياً إلى معرفة ماذا كان يجري على "المقطع" ***غير المنتهي*** بأكمله على الإطلاق، لكي يقوم بأي تنبؤ حول ماسيجري في نقطة ما في لحظة فيما بعد. إذ لايوجد في النظرية النيوتنية أي تحديد للسرعة التي تنتقل فيها المعلومات، وإنما تنتقل القوى فيها، في الحقيقة، ***آنياً***.

ولكني لن أقدم للقارئ سوى بعض الملاحظات حول الحتمية في النسبية ***العامة***، لأنها موضوع أعقد بكثير مما هي في النسبية الخاصة. إذ عليّ أولاً، أن أستخدم سطحاً S ***شبيهاً بالمكان*** (بدلاً من مجرد سطح متزامن) وعندئذ يتبين أن معادلات أينشتين تؤدي فعلاً إلى سلوك

---

† فالمنطقة المحدودة التي عناها منذ قليل هي مبدئياً مجموعة النقاط من S التي يصل الضوء الصادر منها إلى الحادث P قبل حدوثه (راجع الشكل 5-34).

* ويمكن أن يشار هنا أيضاً إلى أن المعادلة الموجية (أنظر الحاشية في ص 232) هي معادلة نسبوية كمعادلات مكسويل. لذلك، فإن "ظاهرة اللاحسوبية" التي ذكرها بور-إل وريشارد، والتي أتينا على ذكرها سابقاً لاتتعلق إلا بالبيانات الأولية في منطقة محدودة S فحسب.



الشكل 5-34: يتوقف مايحدث عند P على البيانات المعطاة في منطقة منتهية فحسب من المكان المتزامن. لأن تأثير بقية نقاط هذا المكان، لايمكن أن يصل إلى P عند حدوثه، وإلا لاحتاج أن ينتقل بسرعة أكبر من سرعة الضوء.

حتمي محلي بالنسبة للحقل الثقالي، مع افتراضنا (كما هي الحال عادة) أن الحقول المادية المساهمة في الموتر ENERGY تؤدي دورها بطريقة حتمية. وعلى الرغم من ذلك توجد تعقيدات كثيرة. فهندسة الزمكان نفسها - بما في ذلك بنيتها "السببية" التي تعينها مخاريط الضوء c - هي في الحقيقة شيء من الأشياء التي ينبغي تعيينها. ولكننا لانعرف بنية الزمكان هذه المعينة بمخاريط الضوء في أزمنة لاحقة، لذلك لانستطيع ان نعرف إلى أي جزء من S سنحتاج لكي نعين ماالذي سيحدث في حادث P سيقع في المستقبل. فمن الجائز في بعض الحالات المتطرفة أن يكون السطح S ***بأكمله*** غير كافٍ، وعندئذ تغيب الحتمية بالتالي بمفهومها الكلي نهائياً! (وهنا تثار مسائل صعبة متصلة بمشكلة هامة لاتزال من غير حل في نظرية النسبية العامة تدعى مشكلة "الرقابة الكونية" "cosmic censorship" - ولها علاقة بتكون ***الثقوب السوداء*** (Tipler et al 1980) (راجع الفصل السابع ص 394) وكذلك الحاشية في الصفحة 397 والصفحة 405). وقد يبدو أن أي "عجز ممكن في الحتمية"، قد يطرأ في حالة الحقول الثقالية "المتطرفة" جداً، هو من غير المحتمل إلى حد بعيد أن يكون له صلة بالشؤون المتعلقة بأمور على مستوي حاجات الإنسان، ولكن يتبين لنا من ذلك على الأقل أن مسألة الحتمية في النسبية العامة ليست محسومة أبداً كما قد يودها المرء أن تكون.

الحسوبية في الفيزياء الكلاسيكية: أين نقف منها؟

لقد حاولت خلال هذا الفصل أن أترك إحدى عيني مفتوحة على قضية ***الحسوبية*** باعتبارها تختلف عن الحتمية، وحاولت أن أشير إلى أن قضاياها، حين تتعرض لمشاكل "حرية الإرادة" والظواهر العقلية، هي بأهمية قضايا الحتمية على الأقل. إلا أن الحتمية نفسها ليست كما سار

بنا الظن إلى الاعتقاد، محسومة واضحة في النظرية الكلاسيكية. فقد رأينا كيف أن معادلة لورنتز الكلاسيكية، الخاصة بحركة جسيم مشحون، تسفر عن بعض المشاكل المحيرة (منها كما نذكر "حلول ديراك الفارّة") واشرنا كذلك إلى وجود بعض الصعوبات التي تواجه الحتمية في النسبية العامة. ومن البديهي أنه لايمكن أن توجد الحسوبية في هذه النظريات إذا لم توجد فيها الحتمية. على أنه قد يبدو أن ليس لغياب الحتمية في اي من الحالتين اللتين أتينا على ذكرهما شأن فلسفي كبير جداً بالنسبة لنا، كما لايوجد أيضاً "موضع" "لحرية الإرادة" عندنا في مثل هذه الظواهر، ذلك لأننا، في حالة جسيم مشحون، لانظن أن معادلة ديراك الكلاسيكية الخاصة بجسيم نقطي (كما حلها ديراك) هي بالمستوي الفيزيائي المناسب الذي يمكن أن تثار فيه مثل هذه القضايا. وهذا هو الحال أيضاً في النسبية العامة، لأن المستويات التي يمكن أن تؤدي فيها هذه النظرية الكلاسيكية إلى مثل هذه القضايا (الثقوب السوداء، إلخ) هي مستويات تختلف اختلافاً كلياً عن مستوى أدمغتنا.

ترى إلى أين وصلنا الآن بالنسبة ***للحسوبية*** في النظرية الكلاسيكية؟ إن الوضع، في حال النسبية العامة، لايختلف اختلافاً ذا قيمة عما هو عليه في النسبية الخاصة – هذا على الرغم من الفروق التي ذكرناها في السببية والحتمية – الأمر الذي لايستبعد أن يتوقعه المرء بنفسه. ففي الحالين يتعين سلوك المنظومة الفيزيائية في المستقبل بالبيانات الابتدائية، لذلك يتعين هذا السلوك أيضاً، كما هو واضح، بطريقة حسوبة بهذه البيانات[27] (وطريقة التفكير مشابهة لتلك التي عرضتها في حالة النظرية النيوتنية، هذا إذا تركنا جانباً نموذج اللاحسوبية "القليل الشأن" الذي وجده بور–إل وريشار ـ كما ذكرناه أعلاه في حال المعادلة الموجية – والذي لانصادفه في حال البيانات التي تتغير ***بسلاسة***). إذ يصعب علينا بالفعل أن نرى أنه يمكن أن يوجد عنصر "لاحسوب" بالمعنى الصحيح في أي من النظريات التي ناقشناها إلى الآن. وظهور السلوك "الشواشي" أمر متوقع حتماً في أي من هذه النظريات التي يمكن أن يؤدي فيها تغير ضئيل جداً في البيانات الابتدائية إلى فروق هائلة في السلوك الناتج. (ويبدو أن هذا مانصادفه في النسبية العامة. أنظر Misner 1969 ، و Belinskii 1970). ولكن يصعب، كما ذكرنا سابقاً، أن نرى كيف يمكن لهذا النموذج من اللاحسوبية – أعني "غير القابل للتنبؤ" – أن يكون ذا فائدة ما في آلة تجرب أن تسيطر على العناصر اللاحسوبة المحتملة في القوانين الفيزيائية. وإذا أمكن "للعقل" أن يستخدم بأي طريقة عناصر لاحسوبة، فلابد أن تكون، كما سيتضح، عناصر خارجة عن الفيزياء الكلاسيكية، الأمر الذي سنحتاج لإعادة دراسته فيما بعد، ولكن بعد أن نلقي نظرة على نظرية الكم.

الكتلة والمادة والواقع

دعونا نقيّم باختصار تلك الصورة التي قدمتها لنا الفيزياء الكلاسيكية عن العالم. ثمة أولاً زمكان يقوم بدور أساسي هو دور الحلبة التي تجري عليها مختلف الفعاليات الفيزيائية. ثم هناك أشياء فيزيائية منهمكة في هذه الفعاليات، ولكنها مقيدة بقوانين رياضية دقيقة محكمة. وتنقسم هذه الأشياء

الفيزيائية إلى نوعين: ***الجسيمات والحقول***. أما الجسيمات فلم نتحدث عن طبيعتها الفعلية وصفاتها المميزة إلا القليل، ماعدا أن لكل منها خطه الكوني الخاص ويملك كتلة (سكونية) خاصة به، ومعها، ربما، شحنة كهربائية، إلخ. أما الحقول فقد وصفناها من وجهة خاصة جداً – مع العلم أن الحقل الكهرطيسي يخضع لمعادلات مكسويل، والحقل الثقالي يخضع لمعادلات أينشتين.

أما الجسيمات فتعامل بطريقتين مختلفتين لكل منهما ظرفها، فإذا كانت كتلتها ضئيلة إلى درجة تسمح بإهمال تأثيرها في الحقول فتدعى عندئذ ***جسيمات اختبارية***، ولامجال للالتباس في حركتها ***تحت تأثير الحقول***. وعندئذ يصف قانون القوة اللورنتزية استجابة هذه الجسيمات الاختبارية للحقل الكهرطيسي، كما يعبر قانون السير في الخط الجيوديزي عن استجابتها للحقل الثقالي (تركّب الاستجابتان بالصورة المناسبة في حال وجود الحقلين معاً). لذلك يجب أن تعد هذه الجسيمات، ***جسيمات نقطية***، أعني أن خطها الكوني له بعد واحد. أما حين تدعو الحاجة إلى اعتبار هذه الجسيمات ***مصادر*** للحقول وإلى حساب تأثيرها في الحقول الأخرى (وبالتالي في الجسيمات الأخرى)، فعندئذ يجب أن ننظر إليها نظرتنا إلى أشياء ممتدة في المكان حتى مدى معين. وإلا لأصبح الحقل في الجوار المباشر لكل جسيم لانهائياً. وتعطينا هذه المصادر الممتدة توزع التيار والشحنة $(\rho, \vec{j})$ الذي نحتاجه في معادلات مكسويل والموتّر ENERGY الذي نحتاجه في معادلات أينشتين. ثم إن للزمكان الذي توجد فيه هذه الجسيمات والحقول، علاوة على كل ذلك، بنية متغيرة هي نفسها التي تصف الثقالة مباشرة. كما تشارك "حلبة الأحداث" [أي الزمكان] نفسها في صميم هذا النشاط الجاري فيها.

هذا ماتعلمناه من الفيزياء الكلاسيكية عن طبيعة الواقع الفيزيائي، وهو بلاشك كثير، ولكن من الواضح في الوقت نفسه أننا لايجوز أن نكون متعجرفين جداً فنرفض أن تأتي يوماً ما فكرة أحدث وأكثر عمقاً لتحل محل ماتعلمناه. ففي الفصل التالي سنرى أن التغيرات الثورية التي أتت بها النظرية النسبية نفسها ستبهت صورتها تقريباً حتى لتكاد تصبح غير ذات أهمية بالمقارنة مع التغيرات التي أتت بها نظرية الكم. على أننا لم ننته بعد تماماً من النظرية الكلاسيكية ومن كل ماقالته لنا عن الواقع المادي، إذ لايزال لديها مفاجأة أخرى بالنسبة لنا.

ترى ماهي "المادة"؟ إنها تلك الخامة أو الجوهر الحقيقي الذي تتكون منه الأشياء الفيزيائية الفعلية – أي "أشياء" هذا العالم. إنها الشيء الذي صنع منه أنت وأنا ومنازلنا. ولكن كيف يمكننا أن نقدر ***"كمية"*** هذه المادة؟ لقد سبق لكتب الفيزياء المدرسية أن زودتنا بإجابة نيوتن الواضحة، وقالت إن مايقيس كمية المادة في شيء أو في مجموعة أشياء ***هو الكتلة***. ويبدو أن ذلك صحيح فعلاً – إذ لاتوجد كمية فيزيائية أخرى يمكن أن تنافس الكتلة منافسة جدية في قياس المادة الكلية الحقيقي. وهذه الكمية علاوة على ذلك ***محفوظة***، بمعنى أن الكتلة، وإذن كل المحتوى المادي في منظومة ما، هو كمية يجب أن تظل نفسها دائماً.

إلا أن أينشتين وجد في النسبية الخاصة ذلك الدستور الشهير:

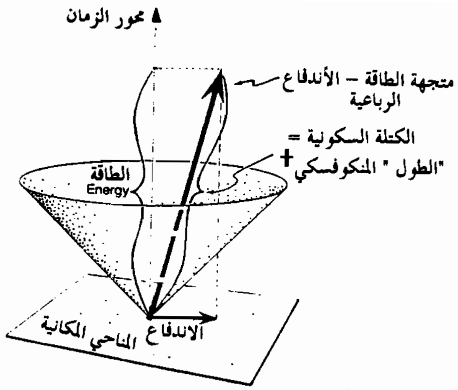
$$E = mc^2$$

الذي ينص على أن الكتلة m والطاقة E تتبادل إحداهما محل الأخرى. ومثال ذلك أنه حين تتفكك نواة ذرة اليورانيوم، تنقسم إلى قطع أصغر، فلو أمكن إعادة هذه القطع إلى السكون، لوجدنا أن مجموع كتلها أصغر من كتلة نواة ذرة اليورانيوم الأصلية. ولكن لو أدخلنا في حسابنا ***طاقة الحركة*** - أي الطاقة ***الحركية*** (راجع ص 208)* لكل قطعة وحولناها إلى كتلة بتقسيمها على c^2 (بحسب العلاقة $E = mc^2$) لوجدنا أن مجموع الكتل الكلي ***لم يتغير*** فعلاً. فالكتلة إذن لاتتغير فعلاً. ولكن لما كان جزء منها في صورة طاقة، فهي لذلك تبدو طبعاً أصغر من أن تكون قياساً للمادة الحقيقية. على أن الطاقة تتوقف في النهاية على السرعة التي تتحرك بها هذه المادة. لاشك أن طاقة القطار السريع الحركة هي طاقة كبيرة، ولكن لو كنا من ركابه، لما كان له من وجهة نظرنا حركة على الاطلاق. فطاقة حركة هذا القطار (من دون أن نأبه لطاقة ***جسيماته الحرارية*** في حركتها العشوائية الفردية) "تتحول إلى الصفر" عندما نختار وجهة النظر المناسبة هذه. ولكن المثال الصارخ الذي تظهر فيه نتيجة علاقة أينشتين بين الكتلة والطاقة بأجلى مظاهرها، هو أن نأخذ تفكك نوع من الجسيمات المادية تحت الذرية هو تفكك الميزون π^o، وهذا بلاشك ***جسيم مادي*** له كتلة (موجبة) معرّفة جيداً، وبعد نحو من 10^{-16} من الثانية يتفكك (كنواة ذرة اليورانيوم أعلاه، ولكن بسرعة أكبر بكثير) وهو يتفكك دائماً تقريباً إلى ***فوتونين*** فحسب (الشكل 5-35) فبالنسبة لراصد ساكن بالنسبة للميزون π^o يتفكك هذا إلى فوتونين يحمل كل منهما نصف الطاقة، وهي في الحقيقة نصف كتلة الميزون π^o. إلا أن كتلة هذا الفوتون من نوع "سديمي" إذ إنها ***مجرد طاقة***، لأننا لو تحركنا بسرعة في اتجاه أحد الفوتونين، لتمكنا من تقليص كتلته التي هي على شكل طاقة إلى قيمة صغيرة بقدر مانريد† - إن كتلة الفوتون الصحيحة (أو كتلته السكونية التي سنتحدث عنها عما قريب) هي في الحقيقة ***صفر***. فكل هذه الأمثلة تؤكد تلك الصورة المتسقة للكتلة المحفوظة، ولكنها ليست بالتحديد تلك الصورة التي كانت لدينا سابقاً. ويمكن للكتلة أن تظل [بلاشك]، بمعنى ما، قياساً لِ "كمية المادة"، ولكن كان ثمة تغير بارز في وجهة النظر، إذ أصبحت الكتلة مكافئة للطاقة، وتتوقف كتلة المنظومة، كالطاقة، على حركة الراصد.

---

* الطاقة الحركية في نظرية نيوتن هي $\frac{1}{2} mv^2$، حيث m كتلة الجسيم و v سرعته. أما في النسبية الخاصة، فعبارة الطاقة الحركية أكثر تعقيداً من ذلك إلى حد ما.

† في الحقيقة ان ما يتغير بالنسبة لنا هو تواتر الفوتون ν (بحسب قانون دبلر Doppler الصحيح في النسبية الخاصة) ويصبح ضعيفاً، فبحسب العلاقة الكمومية $E = h\nu$ تتقلص طاقة الفوتون.



الشكل 5-35: متجهة الطاقة – الاندفاع الرباعية

ويحسن بنا أن نكون أكثر وضوحاً بشأن وجهة النظر التي توصلنا إليها. إن الكمية المحفوظة التي أخذت دور الكتلة هي شيء كامل يدعى ***متجهة "الطاقة – الاندفاع" الرباعية***. ويمكن تمثيل هذه المتجهة في الفضاء المنكوفسكي بسهم عند المبدأ O، موجه إلى ***داخل*** مخروط الضوء في O في اتجاه المستقبل (أو في الحالة الحدية للفوتون، يكون واقعاً على هذا المخروط). أنظر الشكل 5-35. إن هذا السهم الذي يشير إلى الاتجاه نفسه الذي يسير فيه الخط الكوني للجسم، يضم كل المعلومات عن طاقة هذا الجسم، وعن كتلته، وعن اندفاعه. وهكذا فإن المركبة t (أو "ارتفاع") رأس هذا السهم، وفقاً لقياسه في قاعدة راصد ما، يصف ***كتلة*** هذا الجسم ***(أو طاقته*** مقسومة على c^2) بالنسبة لهذا الراصد، في حين أن مركباته المكانية تعطينا ***اندفاعه*** (مقسوماً على c).

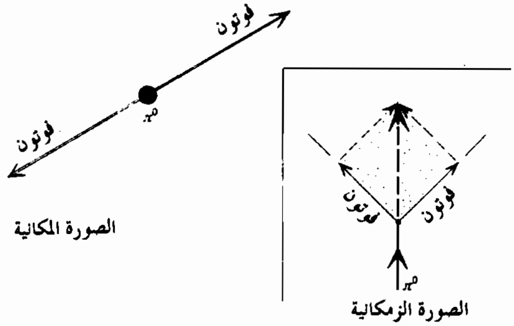
إن طول هذا السهم† بحسب منكوفسكي هو كمية مهمة تدعى ***الكتلة السكونية***، بمعنى أنه يعطينا كتلة الجسم في نظر راصد ساكن بالنسبة لهذا الجسم. وقد يحاول المرء اتخاذ وجهة النظر القائلة إن هذا الطول يمكن أن يصلح قياساً "لكمية المادة". إلا أن هذا المقدار ليس جمعياً†† فقد تنقسم المنظومة إلى قسمين من دون أن تكون كتلة المنظومة الأصلية السكونية مساوية لمجموع الكتلتين السكونيتين لقسميها. ومثالاً على ذلك لنتذكر تفكك الميزون π^0. فهذا الجسيم له كتلة سكونية موجبة، في حين أن الكتلة السكونية لكل من الفوتونين الناتجين من التفكك هي صفر. على أن هذه الخاصة الجمعية تسري فعلاً على كامل السهم (أي المتجهة الرباعية)، ولكن يجب أن "نجمع"

---

† إن هذا الطول بحسب الشكل الذي اعتدنا أن نفسره تفسيراً إقليدياً هو أكبر من ارتفاعه (الطاقة) إلا أنه بحسب منكوفسكي (راجع ص 2 ـ 240) أقصر منه أي أن الكتلة السكونية لجسم ما أصغر من كتلته الحاصلة حين يتحرك (وهذا صحيح لأن الطاقة الكلية = طاقة الكتلة السكونية + طاقة الحركة).

†† لنتذكر أن العدد الحقيقي المقترن بمقدار ما، لايمكن أن يكون قياساً لكمية هذا المقدار إلا إذا كان جمعياً بمعنى أنه إذا كان a قياساً لمقدار A من نوع ما و b قياساً لمقدار B من نوع الأول نفسه فالمقدار المكون من ضم المقدار بن A و B قياسه a + b وهذا معنى الجمعي.

هنا بحسب قانون الجمع المتجهي الذي مثلناه في الشكل 5-6، فهذا ***السهم بكامله*** [أي ليس مجرد طوله] هو مقياس "كمية المادة"



الشكل 5-36: تفكك الميزون π° الذي له كتلة إلى فوتونين عديمي الكتلة. وتوضح الصورة الزمكانية كيف تكون المتجهة الرباعية الأبعاد "للطاقة – الاندفاع" محفوظة. والمتجهة الرباعية الأبعاد للميزون π° هي مجموع متجهتين رباعيتين لفوتونين يجمعان بحسب طريقة متوازي الأضلاع (وقد أظهرناه مظللاً على الشكل).

ولقد أشرنا عند حديثنا عن حقل مكسويل الكهرطيسي كما نذكر إلى أن هذا الحقل يحمل طاقة، أي يجب أن يكون له كتلة بحسب المعادلة $E = mc^2$. فحقل مكسويل هو إذن مادة أيضاً! ولايمكننا إلا أن نقبل بذلك، لاسيما أن هذا الحقل يساهم مساهمة فعالة في القوى التي تمسك الجسيمات بعضها مع بعض، بمعنى أن الحقول الكهرطيسية الموجودة داخل أي جسم تشارك مشاركة جوهرية[28] في كتلته.

ولكن ماذا بشأن حقل أينشتين الثقالي؟ إنه يشبه حقل مكسويل من أوجه عديدة. بل يمكن للأجسام المتحركة التي لها كتلة أن تبث (بحسب نظرية أينشتين) أمواجاً ***ثقالية*** (ص 258) تشبه الأمواج الكهرطيسية التي تبثها الأجسام المشحونة عند حركتها تبعاً لنظرية مكسويل، وهي تسير مثلها بسرعة الضوء وتحمل طاقة. ولكن هذه الطاقة لاتقاس بالطريقة المتعارف عليها والتي تتم بوساطة الموتِّر الذي دعوناه سابقاً ENERGY. إذ إن هذا الموتّر في حالة الموجة الثقالية (الصرفة) يساوي ***الصفر*** في كل موضع من الفضاء! على أن المرء قد يخطر له أن ***انحناء*** الزمكان (ويُعطى بأكمله في هذه الحالة بالموتّر WEYL) هو الذي يمثل بطريقة أو بأخرى "مادة" الأمواج الثقالية. ولكن ثبت أن الطاقة الثقالية ***ليست محلية***، وهذا يعني أننا لانستطيع تعيين قياس هذه الطاقة بمجرد فحص انحناء الزمكان في منطقة محدودة. إن طاقة الحقل الثقالي – والكتلة إذن – مقدار أشبه مايكون بالشيء الزئبقي الذي لايمكن الإمساك به ويمتنع عن التثبيت في أي موضع واضح. ولكن لايجوز تجاهله أبداً. إنه ***موجود*** قطعاً في مكان ما، ولابد أن يدخل في الحساب عند الحديث عن مفهوم انحفاظ الكتلة الكلية. وثمة قياس صالح (وأكيد) للكتلة (Bondi 1960، Sachs 1962) يطبق على الأمواج الثقالية. ولكن اللامحلية للأسف هي شيء من قبيل أنه يثبت في النهاية أن هذا القياس

يمكن أن يكون في بعض الأحيان ***غير الصفر*** في مناطق ***منبسطة*** من الزمكان - بين سطوعين للإشعاع (أشبه بالهدوء داخل عين الإعصار) - حيث الزمكان في الحقيقة مجرد كلياً من الانحناء (راجع Penrose و Rindler 1986 ص427) (أعني أن الموترين WEYL و RICCI كلاهما يساوي الصفر)! ويبدو أننا في هذه الحالات مضطرون إلى التسليم بأنه إذا كان لابد لهذه الكتلة - الطاقة من أن تكون متموضعة، فهي متموضعة في هذا ***الفضاء الفارغ المنبسط*** - أي في منطقة مجردة نهائياً من المادة ومن الحقول مهما كان نوعها. و "كمية المادة" عندئذ، في هذه الظروف الغريبة إما موجودة في أكثر المناطق فراغاً من المناطق الخالية، وإما أنها غير موجودة على الاطلاق.

وهذا مايبدو أنه مفارقة بحتة. ولكنه، على رغم ذلك، نتيجة محددة لما تقوله لنا أفضل نظرياتنا الكلاسيكية - التي هي في الحقيقة نظريات **فخمة** - حول طبيعة مادة عالمنا "الحقيقية". فالحقيقة المادية تبعاً للنظرية الكلاسيكية - بصرف النظر عن نظرية الكم التي نحن على وشك التعرف إليها - هي شيء أكثر ضبابية بكثير مما كنا نظن. بل إن تقديرها كمياً - وحتى هل هو موجود أم لا - يتوقف بصورة واضحة على مسائل مرهفة، فلا يمكن التحقق منه محلياً فحسب! ولكن إن بدت لكم هذه اللامحلية محيرة، فهيئوا أنفسكم لمجيء المزيد من الصدمات الأعنف.

الملاحظات

1 - من المذهل حقاً أن الانحرافات عن التصور النيوتني، كانت كلها ترتبط بطريقة أو بأخرى ارتباطاً أساسياً بسلوك الضوء. وكان أولها "تحرر" الحقول اللامادية، ولكن الحاملة للطاقة، في نظرية مكسويل الكهرطيسية. وثانيها، كما سنرى، الدور الحاسم الذي تلعبه سرعة الضوء في نظرية أينشتين النسبية. وثالثها الانحراف الطفيف عن نظرية نيوتن الثقالية، الذي أتت به نسبية أينشتين العامة، والذي لايكون له أثر يذكر إلا حين يمكن مقارنة السرعة بسرعة الضوء (انحراف مسار الضوء بالقرب من الشمس، حركة عطارد، سرعات الانفلات القريبة من سرعة الضوء في الثقوب السوداء...). رابعها المثنوية موجة-جسيم في النظرية الكمومية، التي لوحظت أول الأمر في سلوك الضوء. وأخيراً، هناك الإلكترودیناميك (التحريك الكهربائي) الكمومي، وهو نظرية الحقل الكمومي للضوء والجسيمات المشحونة. وهكذا، كان من المعقول أن نفكر أن نيوتن نفسه ربما كان على استعداد لأن يسلم بوجود قضايا عميقة تواجه تصوره عن العالم، وهي تكمن متسترة في سلوك الضوء الغامض (أنظر Newton 1730، وكذلك Penrose 1987a).

2 - هناك حقل معرفي رائع حسن الإعداد ومفهوم وأعني به ***ترموديناميك*** كارنو Carnot [كلاوزيوس] ومكسويل وكلفن Kelvin وبولتزمان Boltzmann وآخرين - وقد حذفته من التصنيف. وقد يكون هذا الحذف محيراً لبعض القراء، ولكن حذفه كان مقصوداً. إذ إني أنا بنفسي، ولأسباب قد تتضح في الفصل السابع، فضلت الامتناع عن وضع الترموديناميك، بوضعه الراهن، في فئة النظريات **الفخمة** الحالية. وعلى رغم ذلك، سيرى فيزيائيون عديدون على الأرجح أنه من المهانة أن يوضع مثل هذا الحقل الأساسي البديع من الأفكار في فئة متدنية هي فئة **المفيدة** لاأكثر! وأنا أرى أن الترموديناميك كما نفهمه عادة، ليس نظرية فيزيائية بكل معنى الكلمة - أي نظرية بالمعنى الذي أعنيه هنا (كما أرى أن ذلك يسري على الهيكل الرياضي المبطّن للترموديناميك والمسمى الميكانيك الإحصائي)، والسبب في ذلك أن الترموديناميك لايطبق إلاّ على القيم الوسطى، وليس على المكونات الفردية في المنظومة - ثم إنه إلى حد ما نتيجة لنظريات أخرى. وقد اتخذت هذه الحقيقة حجة لكي أتجنب المشكلة وأترك الترموديناميك خارج التصنيف، فأنا أنادي، كما سنرى في الفصل السابع، بوجود علاقة حميمة بين الترموديناميك ونظرية سبق أن ذكرت أنها تنتمي إلى الفئة **المفيدة**، وأعني بها نموذج الانفجار العظيم القياسي. وأعتقد أن التوحيد المناسب بين هاتين المجموعتين من الأفكار (وهو توحيد نفتقده حالياً إلى حد ما) يجب أن ننظر إليه بأنه هو النظرية الفيزيائية التي تحقق المعنى المطلوب - لابل نظرية يمكن ضمها إلى فئة الفخمة. وهذا أمر سنحتاج للعودة إليه فيما بعد.

3 ـ سألني زملائي: أين أصنف "نظرية المتلويات" twistor theory – وهي مجموعة أفكار وطرائق مدروسة ارتبط اسمي بها على مدى سنوات عديدة. ولما كانت نظرية المتلويات هي نظرية أخرى عن العالم الفيزيائي، فهي لايمكن أن تكون في فئة أخرى غير فئة **التلمسية**. ولكنها ليست نظرية في النهاية إلى حد بعيد، لأنها تسجيل رياضي للنظريات الفيزيائية الأولى المعدة خير إعداد.

4 ـ يبدو أن غاليليه قد استخدم هو كذلك ميقاتية مائية (أنظر Barbour 1989).

5 ـ لقد ارتبط اسم نيوتن بهذا النموذج – وحتى بالميكانيك "النيوتني" بمجموعه في الحقيقة – لمجرد أنها تسمية مناسبة. ولكن وجهة نظر نيوتن الخاصة تجاه الطبيعة/*الحقيقية* للعالم الفيزيائي، تبدو كانها كانت أقل عجزاً وأكثر رهافةً مما تدل عليه هذه التسمية الآن (والشخص الذي دعا بملء فيه إلى هذا النموذج "النيوتني" كان، كما يبدو، بوسكوفيتش R.G. Boscovich (1711 - 1787).

6 ـ لفت نظري رافيل سوركين إلى أنه يمكن أن يعدّ تطور هذا النموذج الخاص "حسوباً" بطريقة لاتختلف كثيراً عن تلك التي نعامل بها المنظومات النيوتنية مثلاً. فإذا نظرنا في متتالية حسابات C_1 ، C_2 ، C_3 ... تتيح حساب سلوك المنظومة في زمن أبعد فأبعد في المستقبل دونما حدود وبدقة متزايدة. ففي الحالة التي تهمنا هنا يمكن تحقيق هذا الهدف بتعريف C_N على أنه نتيجة تأثير آلة تورنغ $T_u(m)$ عدداً من المرات المتتالية قدره N. وبوضع □ = $T_u(m)$ إذا لم تتوقف بعد في هذه المرحلة. ومع ذلك من السهل في هذه الحالة أن نحور النموذج المعتمد بصورة متفوقة دوماً على هذا النوع من "الحساب"، إذ يكفي إدخال تطور يدخل بدلاً من □ = $T_u(m)$ صيغة ثنائية القيمة مثل " T(q) تتوقف مهما كانت (q) " (إن المسألة غير المحلولة حول وجود عدد لانهائي من أزواج الأعداد الأولية التي يساوي الفرق بينها 2 هي مثال على هذا النوع من الصيغ).

7 ـ فكما اقتُرح في الفصل الرابع (الملاحظة 9 ص188) يمكن أن تؤدي نظرية بلوم – شوب – سميل Blum - Shub - Simale الجديدة إلى إعطاء طريقة لحل بعض من هذه القضايا بطريقة رياضية أكثر تقبلاً.

8 ـ إن معادلات هاملتون الفعلية، وإن لم تكن – كما هو محتمل – وجهة نظره هو بالتحديد، فقد كانت معروفة لدى الرياضي الفرنسي/الإيطالي العظيم لاغرانج (1736-1813) Joseph C. Lagrange قبل هاملتون بأربع وعشرين سنة. كما كانت صياغة الميكانيك في معادلات أولر–لاغرانج لاتقل أهمية عن معادلات هاملتون، ففيها نرى كيف يمكن اشتقاق قوانين نيوتن من مبدأ شامل وهو ***مبدأ الفعل الأصغري*** (الاستقراري) (لواضعة

موبرتوي P. L. M. de Maupertuis) ولمعادلات أولر-لاغرانج، فضلاً عن قيمتها النظرية العظيمة، مقدرة رائعة من الناحية العملية في إجراء الحسابات.

9 - إن الوضع في الحقيقة "أسوأ" من ذلك، بمعنى أن حجم فضاء الطور بحسب ليوفيل ليس سوى واحد من طائفة كاملة من "الحجوم" المختلفة الأبعاد (التي تعرف باسم صوامد بوانكاريه)، فهذه الحجوم تبقى ثابتة في التطور الهاملتوني. ومع ذلك، فقد كنت غير عادل قليلاً حين انحرفت مع حججي بالنسبة لنظرية ليوفيل. فالمرء باستطاعته أن يتخيل منظومة فيزيائية فيها درجات الحرية (المساهمة في قياس الحجم في فضاء الطور) يمكن أن تتخامد في أماكن لاأهمية لها (كالإشعاع الذي ينفلت بعيداً إلى اللانهاية). وهكذا يمكن للحجم ***الذي يهمنا*** من فضاء الطور أن يصغر.

10 - وهذه الحقيقة الثانية (عدم الاهتمام بحركات الذرات وتفصيلاتها) هي بوجه خاص، مادة هائلة بالنسبة لتطور العلم. لأن سلوك الأجسام الكبيرة الديناميكي، كان سيصبح من دونها غير مفهوم، وماكان ليقدم سوى لمحة صغيرة عن القوانين الدقيقة التي يمكن أن تطبق على الجسيمات نفسها. وفي ظني أن السبب الذي دعا نيوتن إلى الإلحاح القوي على قانونه الثالث، هو أن تحول السلوك الديناميكي من الأجسام المجهرية إلى الأجسام الجهرية كان سيصبح من دونه، غير مفهوم.

ثم هناك حقيقة "خارقة" أخرى كانت أساسية جداً بالنسبة لتطور العلم. وهي أن قانون التربيع العكسي هو القانون الوحيد للقوة (المتناقصة مع تزايد المسافة) التي تكون مدارات الأجسام حول جسم مركزي هي أشكال هندسية بسيطة. إذ ماالذي كان باستطاعة كبلر أن يفعله لو كانت القوة متناسبة عكساً مع المسافة أو مع مكعب المسافة؟

11 - كان الدافع إلى اختيار جملة الواحدات التي يعبَّر فيها عن الحقلين الكهربائي والمغنطيسي هو الرغبة في أن يكون لمعادلات مكسويل شكلٌ شبيهٌ بالشكل الذي كتبها فيه مكسويل نفسه (ماعدا أن كثافة الشحنة تكتب عند مكسويل بالشكل $c^{-2}\rho$) أما إذا استعملت جمل واحدات أخرى فإن الثابتة c يمكن أن تختفي نهائياً.

12 - لدينا، في حقيقة الأمر، عدد ***غير منتهٍ*** من x_i و p_i ، ولكن ثمة تعقيد آخر وهو أننا لانستطيع ببساطة استخدام القيم الحقلية لهذه الإحداثيات، إذ إن هناك حاجة لإدخال "كمون" في حالة حقل مكسويل الكهرطيسي لكي نتمكن من تطبيق مشروع هاملتون.

13 - إذ إن هذه لايمكن حساب تفاضلها مرتين.

14 – تعطينا معادلات لورنتز ***القوة المؤثرة*** في جسيم مشحون، والناشئة عن الحقل الكهرطيسي الذي يوجد فيه، فإذ عرفت كتلة الجسيم، أمكن حساب تسارعه من قانون نيوتن الثاني. إلاّ أن الجسيمات المشحونة تتحرك غالباً بسرعة قريبة من سرعة الضوء،

لذلك تصبح نتائج النسبية الخاصة مهمة عندئذ، وتظهر آثارها على القيمة التي يجب أن تعطى في الحقيقة لكتلة الجسيم (أنظر المقطع التالي). ومثل هذه الأسباب هو الذي أخر اكتشاف القانون الصحيح للقوة المؤثرة في جسيم مشحون حتى مجيء النسبية الخاصة.

15 - الواقع أن أي جسيم كمومي في الطبيعة يسلك، بمعنى ما، سلوك ساعة من هذا النوع قائمة بذاتها. وسنرى في الفصل السادس أن كل جسيم كمومي يرتبط به اهتزاز يتناسب تواتره مع كتلة الجسيم، أنظر ص 281 والساعات الحديثة الأكثر دقة (وهي ساعات ذرية وساعات نووية) تقوم بصورة أساسية على هذه الحقيقة [صنعت حديثاً ساعة لاتتغير دقتها أكثر من ثانية في المليون عام].

16 - قد يشغل القارئ وجود زاوية حادة عند B في الخط الكوني للتوأم المسافر، وهذا يعني أن تسارع المسافر لانهائي في هذه النقطة. ولكن ليس هذا بالمهم. فلو كان التسارع منتهياً بدلاً من أن يكون لانهائياً، لأصبحت الزاوية الحادة عند B في الخط الكوني للمسافر مدورة، مما لايؤدي إلاّ إلى اختلاف ضئيل جداً في الزمن الكلي الذي قضاه المسافر، ويظل هذا الزمن يقاس "بالطول" المنكوفسكي لخط الكون بأكمله.

17 - تلك هي فضاءات الحوادث التي يجب أن يحكم M بأنها متزامنة تبعاً للتعريف الذي أعطاه أينشتين للتزامن، إذ يستخدم هذا التعريف الإشارات الضوئية التي يرسلها M لتنعكس عند الحوادث وترتد إلى M. أنظر مثلاً Rindler (1982).

18 - المقصود هنا هو تشوه الكرة "الابتدائي" لأن ما يحكم تشوه الكرة هو القيمة الابتدائية للمشتق الثاني (لشكل التوزيع) بالنسبة للزمن (أو "التسارع"). أما معدل تغير الشكل (أو "السرعة") فيؤخذ في البدء صفراً، لأن الكرة بدأت من السكون.

19 - كان أول من قام بالوصف الرياضي لهذه الصياغة الجديدة لنظرية نيوتن، الرياضي الفرنسي اللامع إيلي كارتان Elie Cartan (1923) – وكان ذلك طبعاً بعد نسبية أنشتين العامة.

20 - تُسمّى السطوح المنحنية التي تكون، بهذا المعنى، إقليدية محلياً (حتى في حال أبعاد أكثر) متنوعات † ريمانية Riemanian manifolds – وذلك تكريماً للرياضي ريمان Bernhard Riemann (1826- 1866 الذي كان أول من تقصى هذه الفضاءات متتبعاً أعمالاً هامة سبق أن قام بها غوص Gauss في حالة البعدين. ولكننا نحتاج هنا إلى تعديل ذي دلالة في فكرة ريمان. وأعني بها أن تكون الهندسة ***منكوفسكية*** محلياً،

† جمع متنوعة (معجم الرياضيات، أحمد، دعبول، حمصي).

بدلاً من أن تكون إقليدية. وقد جرت العادة على تسمية هذه الفضاءات متنوعات ***لورنتزية Lorentzian manifolds*** (وهي تسمية تطلق على صنف يدعى متنوعات ريمانية ***كاذبة*** pseudo-Riemannian أو تسمية أقل منطقية، متنوعات ***نصف*** ريمانية semi-Riemannian).

21 ـ قد يعجب المرء كيف يمكن لهذه القيمة ***صفر*** أن تمثل ***نهاية*** عظمى "للطول". لكن الأمر كذلك بالفعل، إنما بصورة خالية من المعنى، لأن الخط الجيوديزي ذا الطول صفر يتميز بأنه لاتوجد خطوط كونية لأي جسيم آخر تصل بين أي نقطتين من نقاطه.

22 ـ الحقيقة أن هذا التفريق بين آثار تشوهية وتغير في الحجم ليس حاسماً باتاً كما قدمته. إذ يمكن لموتّر ريتشي نفسه أن يؤدي إلى شيء من التشوه المدي (ولكن التفريق حاسم كل الحسم في حالة الأشعة الضوئية. راجع Penrose and Rindler (1986) الفصل السابع). ومن يود تعريفاً دقيقاً لموتري ويل وريتشي، يمكنه مراجعة Penrose (1984) and Rindler الصفحتان 240 و 210 (كان هيرمان ويل Hermann Weyl الألماني المولد شخصية رياضية بارزة في القرن العشرين، أمّا غريغوريو ريتشي Gregorio Ricci الإيطالي فكان رياضياً هندسياً على درجة عالية من التأثير، في القرن الماضي، وهو الذي أسس نظرية الموترات).

23 ـ وكان هلبرت David Hilbert قد وجد أيضاً الصيغة الصحيحة للمعادلات الحقيقية في تشرين ثاني/نوفمبر 1915. ولكن الأفكار الفيزيائية في النظرية يعود الفضل فيها كلها بلا منازع إلى أينشتين.

24 ـ إن هذه المعادلات التفاضلية (والكلام موجه لأولئك الذين لديهم معرفة بهذه الأمور) هي، بكل معنى الكلمة، مطابقات بيانكي Bianchi identities مع التبديل فيها بمعادلات أينشتين.

25 ـ توجد بعض البراهين (غير المقنعة) لهذه الحجة راجع Wheeler و Feynman (1945).

26 ـ إن التعبير المستخدم فنياً "فوق سطح" hypersurface أصلح من تعبير "سطح"، لأنه سطح ثلاثي الأبعاد وليس ثنائي الأبعاد.

27 ـ إننا نفتقر في الوقت الراهن "لنظريات" دقيقة تهتم بهذه القضايا، فوجودها سيكون مفيداً وهاماً.

28 ـ هذه المشاركة لايمكن أن تحسب في النظرية الحالية، لأنها تعطي إجابة (موقتة) غير مفيدة، هي اللانهاية!

الفصل السادس

سحر النظرية الكمومية وغموضها

هل يحتاج الفلاسفة إلى النظرية الكمومية؟

يوجد تبعاً للفيزياء الكلاسيكية ووفقاً لحسنا السليم، عالم موضوعي يقع "خارجنا"، وهو يتطور بطريقة واضحة ومحددة لكونه محكوماً بعلاقات رياضية مصوغة بصورة دقيقة. وهذا ينطبق تماماً على نظرية مكسويل وأينشتين بقدر ماينطبق على النظرية النيوتنية. فالواقع الفيزيائي يعتبر إذن موجوداً بصورة مستقلة عنا؛ ولاتتأثر كيفية وجود العالم الكلاسيكي مطلقاً بالطريقة التي يمكن أن نختارها للنظر إليه. وإضافة إلى ذلك ليست أجسامنا وأدمغتنا نفسها إلا جزءاً من هذا العالم، وينبغي إذن النظر إليها أنها، هي أيضاً، تتطور وفقاً للمعادلات الكلاسيكية الدقيقة والحتمية ذاتها. فأفعالنا كلها ينبغي أن تتحدد إذن بهذه المعادلات، بغض النظر عمّا يمكن أن نشعر به من أن رغباتنا الواعية يمكن أن تؤثر في سلوكنا.

ويبدو أن هذه الصورة تكمن في أساس معظم الحجج الفلسفية الجادة(1) المتعلقة بطبيعة الواقع وبإدراكنا الواعي وبإرادتنا الحرة الظاهرية. لكن قد يكون لدى بعض الفلاسفة إحساس مبهم بأنه لابد من وجود دور، أيضاً، ***للنظرية الكمومية quantum theory*** في تكوين المفاهيم الفلسفية حول الواقع؛ أي تلك النظرية الأساسية، إنما المقلقة، التي ظهرت في الربع الأول من هذا القرن نتيجة ملاحظة اختلافات دقيقة بين السلوك الفعلي للعالم ووصف الفيزياء الكلاسيكية له. إلا أن تعبير "النظرية الكمومية" يذكّر الكثيرين بفكرة عامة غامضة عمّا يسمى "مبدأ الارتياب" uncertainty principle الذي يحول دون وصف سلوك الجسيمات والذرات والجزيئات وصفاً دقيقاً، وينتج عنه أن سلوك هذه الجسيمات هو سلوك إحتمالي. في حين أن الوصف الكمومي في واقع الأمر *دقيق جداً*، كما سنرى، على الرغم من أنه يختلف اختلافاً جذرياً عن الوصف الكلاسيكي المألوف. وسوف نرى، إضافة لذلك أنه، بعكس الرأي السائد، لا تظهر الاحتمالات عند المستوى الكمومي الدقيق، أي مستوى الجسيمات والذرات والجزيئات - فهذه تتطور بصورة حتمية - إنما تظهر، على مايبدو، عن طريق فعل غامض، على المستوي الجهري الكبير، مرتبط بظهور العالم الكلاسيكي الذي نستطيع إدراكه إدراكاً واعياً. وسنحاول توضيح هذا الأمر، كما سنحاول فهم الطريقة التي تجبرنا فيها النظرية الكمومية على تغيير نظرتنا إلى الواقع الفيزيائي.

قد يميل المرء إلى الاعتقاد أن الاختلافات بين النظريتين الكمومية والتقليدية هي اختلافات بالغة الصغر، لكن الأمر ليس كذلك دوماً، فهذه الاختلافات تكمن في أساس العديد من الظواهر الفيزيائية في مقياسنا العادي. فوجود الأجسام الصلبة بحد ذاته، ومتانة المواد، وخواصها الفيزيائية، وطبيعة الكيمياء، وألوان الأشياء، وظواهر التجمد والغليان، ووثوقية الوراثة ،كل هذه الأمور، وكثير من الخواص الأخرى المألوفة، يحتاج تفسيرها إلى النظرية الكمومية. وربما كانت ظاهرة الشعور أيضاً شيئاً لايمكن فهمه بلغة كلاسيكية فقط. وربما لم يكن عقلنا مجرد خوارزمية تتحكم بها مانسميه في أي صورة فيزيائية كلاسيكية "أغراض"، وإنما هو أكثر من ذلك، إنه خواص تعود أصولها إلى مميزات غريبة ورائعة من مميزات تلك القوانين الفيزيائية التي تحكم ***بالفعل*** العالم الذي نعيش فيه. وربما كان هذا هو السبب، بمعنى ما، في أننا كمخلوقات ذات إحساس، يجب أن نعيش في عالم كمومي وليس في عالم كلاسيكي تماماً، وذلك على الرغم من كل مايحتويه هذا العالم الكلاسيكي من غنى وغموض. إذ قد يكون العالم الكمومي شرطاً ضرورياً لكي تبنى من مادته الكائنات المفكرة والمدركة؟ ولكن هذه المسألة تبدو أجدر باهتمام إله عزم على بناء عالم مأهول منها باهتمامنا نحن! لكن المسألة تبقى وثيقة الصلة بنا أيضاً. لأنه إذ لم يكن ممكناً للشعور أن يكون جانباً من عالم كلاسيكي فلابد أن يكون عقلنا مرتبطاً عندئذ، بالضرورة، بانحرافات من نوع معين عن الفيزياء الكلاسيكية. وهذه فكرة سأعود إليها فيما بعد في هذا الكتاب.

فإذا كنا ننوي إذن الغوص عميقاً في إحدى مسائل الفلسفة الأساسية التي يمكن صياغتها على الصورة التالية: كيف يسير عالمنا ***فعلاً*** وماالذي يكوّن "عقلنا" الذي هو، في الواقع، نحن ليس إلاّ؟ فما علينا عندئذ إلا أن نتوصل إلى تفهم النظرية الكمومية التي هي أكثر النظريات الفيزيائية دقة وغموضاً. ومع ذلك ربما زودنا العلم يوماً ما بفهم للطبيعة أعمق مما تزودنا به النظرية الكمومية. وإن رأيي الشخصي أن النظرية الكمومية نفسها ليست سوى حل مؤقت، وهي غير ملائمة لتقديم صورة ***وافية*** للعالم الذي نعيش فيه. لكن ليس في هذا أي عذر لنا لكي لانفهمها. فإن كنّا نرغب في الوصول إلى شيء من التبصر الفلسفي فما علينا إلا أن نتفهم، بأفضل شكل، صورة العالم وفقاً للنظرية الكمومية الحالية.

لكن لدى الفيزيائيين النظريين المختلفين، لسوء الحظ، آراء مختلفة جداً (على الرغم من أنها متكافئة من حيث المشاهدة التجريبية) حول ***حقيقة*** هذه الصورة. فهناك العديد من الفيزيائيين، الذين يتبعون خطى العالِم الشهير نيلس بور **Neils Bohr**، يعتقدون أنه لاتوجد صورة موضوعية أصلاً للأشياء. فليس هناك، في الحقيقة، أي شيء "خارجنا" في المستوى الكمومي. أما الواقع فينشأ بطريقة أو بأخرى بفضل نتائج القياس فحسب. وعند مؤيدي وجهة النظر هذه لاتقدم النظرية الكمومية سوى إجراءات حسابية ولاتدّعي أنها تصف العالم كما هو بالفعل.

لكن هذا، في رأيي، موقف انهزامي جداً. لذلك سوف أسلك طريقاً أكثر إيجابية تعزو للوصف الكمومي ***حقيقة فيزيائية موضوعية*** هي ***الحالة الكمومية***.

هناك معادلة دقيقة جداً – هي ***معادلة شرودنغر*** Schrödinger ***تبيّن أن*** تطور هذه الحالة الكمومية الزمني ***هو تطور حتمي تماماً***. لكن ثمة شيء غريب جداً في العلاقة بين الحالة الكمومية التي تتبع هذا التطور الزمني وبين السلوك الفعلي للعالَم الفيزيائي كما يتحقق ***عند رصدنا*** له. فمن حين لآخر – وفي كل مرة نعتبر فيها أن "قياساً" قد أُجري – يجب أن نترك الحالة الكمومية التي كنا نحسب تطورها بكل تؤدة، فهي لن تفيد ***بعدئذٍ*** إلا ***لحساب مختلف الاحتمالات*** لأن "تقفز" الحالة إلى هذه أو تلك من مجموعة الحالات الممكنة الجديدة. وهناك، إضافة إلى غرابة هذا "القفز الكمومي"، مشكلة معرفة ماهية الترتيب، (أو الجهاز)، الفيزيائي الذي يتيح لنا أن نقرر أن "قياساً" قد أجري بالفعل. فأداة القياس، في نهاية المطاف، هي ذاتها مؤلفة من مكونات كمومية وينبغي لها إذن أن تتطور، هي الأخرى، وفقاً لمعادلة شرودنغر الحتمية. ولكن هل وجود كائن واعٍ ضروري لكي يتم حدوث "قياس ما" بالفعل؟ أعتقد أنه لن يؤيد مثل هذا الرأي سوى قلة ضئيلة من الفيزيائيين الكموميين. إذ أليس ***الراصدون من البشر هم أنفسهم مكونين*** أيضاً من مكونات كمومية دقيقة؟!

سوف نتفحص، لاحقاً في هذا الفصل، بعض النتائج الغريبة لهذا "القفز" الذي تتعرض له الحالة الكمومية، فنرى مثلاً كيف أن "القياس" في مكان ما يمكن أن يسبب، كما يبدو، حدوث "قفزة" في مكان بعيد آخر! ولكننا سوف نتعرض، قبل ذلك، لظاهرة أخرى غريبة: ففي بعض الأحيان، حين يوجد سبيلان يمكن أن يسلك جسم ما أحدهما بصورة طبيعية تماماً، بحيث أن كل واحد من السبيلين يمثل أحد الخيارين أمام الجسم، وأنه حين يكون بإمكان الجسم سلوك السبيلين في آن واحد، فإن كلاً منهما ***سيلغي*** الآخر تماماً ولايعود من الممكن سلوك ***أي*** من السبيلين! وسوف نتفحص كذلك، وبشيء من التفصيل، كيف توصف الحالات الكمومية فعلاً، وسوف نرى أن هذا الوصف يختلف اختلافاً بيّناً عن الوصف الكلاسيكي. فسوف نرى مثلاً أنه يمكن للجسيمات أن تبدو وكأنها موجودة في مكانين مختلفين في الوقت ذاته! وسوف نبدأ بتكوين فكرة عن مدى تعقيد الوصف الكمومي لجملة مؤلفة من عدد من الجسيمات، فنرى أنه لايجوز وصف الجسيمات المفردة كلاً على حدة، بل يجب أن تؤخذ بصورة تراكيب (أو انضمامات superpositions) معقدة مكونة من ترتيبات ممكنة لها كلها معاً. وسوف نرى أنه لايمكن أن تكون لجسيمات النوع ذاته هويات منفصلة إحداها عن الأخرى. وسوف نتفحص كذلك، بالتفصيل، الخاصة الغريبة (والأساسية) المسماة ***سبين*** spin وسوف نتعرض للقضايا الهامة التي تثيرها التجربة التخيلية المسماة "قطة شرودنغر" والمفارقة المنطوية عليها، وللمواقف المختلفة التي اتخذها النظريون حيالها في محاولة منهم لحل هذه المعضلة المحيّرة والأساسية جداً.

قد لاتكون بعض محتويات هذا الفصل مفهومة مباشرة كما هو الأمر في الفصول السابقة (أو اللاحقة)، وقد تكون في بعض الأحيان تقنية إلى حد ما. لقد حاولت في عرضي ألا أغش، لذلك علينا أن نبذل جهداً أكبر مما بذلناه في الأجزاء الأخرى لكي نتوصل إلى شيء من الفهم الحقيقي للعالم الكمومي. وإنني أنصح القارئ، كلما بدت له إحدى الحجج غير واضحة، أن يتجاوزها وأن يحاول تكوين فكرة حول بنية الحجج العامة ككل. ولكن إياك والقنوط إذا تبين لك أن الفهم الكامل ممتنع عليك، فهذا من طبيعة الموضوع نفسه!

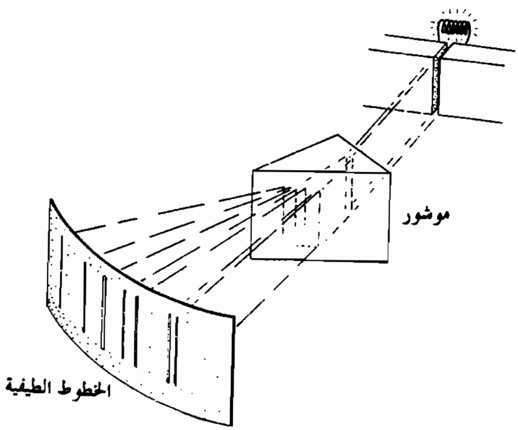
مشاكل في النظرية الكلاسيكية

كيف لنا أن نعرف أن الفيزياء الكلاسيكية ليست النظرية الصحيحة التي تصف عالمنا فعلاً؟ إن الأسباب الرئيسية وراء معرفتنا هذه هي أسباب تجريبية. فالنظرية الكمومية لم تُفرض علينا فرضاً بناءً على رغبة النظريين، وإنما نراهم، في معظم الأحيان، قد وجدوا أنفسهم مدفوعين عنوةً إلى هذا التصور الغريب عن العالم، الذي هو، من عدة نواح غير مرض من وجهة النظر الفلسفية. إلا أن النظرية الكلاسيكية أيضاً، على الرغم من عظمتها الرائعة، لها هي نفسها بعض الصعوبات الجذرية. والسبب الرئيسي في ذلك أنه يجب أن يتعايش معاً نوعان من الأشياء الفيزيائية وهما: ***الجسيمات*** التي يوصف كل منها بعدد صغير، وبخاصة، ***محدود*** (ستة)، من الوسطاء (ثلاثة منها للموضع وثلاثة للاندفاع) ***والحقول*** التي تحتاج لوصفها عدداً ***غير محدود*** من الوسطاء. لكن هذا التقسيم ليس متسقاً من الناحية الفيزيائية. بالفعل، لكي تكون منظومة ما، تحوي في الوقت نفسه جسيمات وحقولاً، في حالة توازن (أي "هادئة" تماماً) يجب أن تكون كل طاقة الجسيمات قد انتقلت إلى الحقول. وهذه نتيجة لنظرية تدعى "توزع الطاقة بالتساوي"، وهي نظرية تنص على أن الطاقة، في حالة التوازن، تتوزع بالتساوي بين كل درجات حرية الجملة. ولما كان للحقول عدد غير منته من درجات الحرية لذلك لايبقى أي شيء للجسيمات المسكينة!

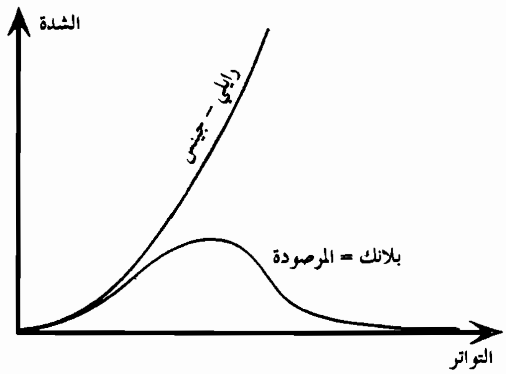
ونخص بالذكر أنه لايمكن أن تكون الذرات، من وجهة النظر الكلاسيكية، مستقرة إذ ينبغي أن تنتقل كل طاقة حركة جسيماتها إلى الأنماط الموجية للحقل. لنتذكر نموذج الذرة المشابهة للمنظومة الشمسية، الذي اقترحه الفيزيائي التجريبي النيوزلندي - البريطاني إرنست رذرفورد عام 1911، ففي هذا النموذج تدور الإلكترونات حول النواة بتأثير القوى الكهرطيسية، مثلما تدور الكواكب حول الشمس بتأثير قوة الجاذبية. ولكن في هذا النموذج مشكلة أساسية يبدو أنه لايمكن التغلب عليها، وهي أنه حين يكون الإلكترون دائراً حول النواة يجب، وفقاً لمعادلات مكسويل، أن يُصدر أمواجاً كهرطيسية تزداد شدتها بسرعة حتى اللانهاية (خلال جزء صغير جداً من الثانية) وذلك خلال دورانه في مدارات تقترب أكثر فأكثر من النواة حتى يقع فيها. لكننا لانلاحظ حدوث شيء من هذا القبيل. وفي الحقيقة إن

مانلاحظه هو شيء لايمكن تفسيره استناداً إلى النظرية الكلاسيكية. فالذرات يمكن أن تُصدر أمواجاً كهرطيسية (أي ضوءاً) إنما بشكل دفقات فقط ذات تواترات (ترددات) خاصة ومحددة جداً، وهي مايسمى ***بالخطوط الطيفية*** الحادة (الشكل 6-1). وإضافة لذلك فإن هذه التواترات تخضع لقواعد "غريبة" لاأساس لها من وجهة نظر الفيزياء الكلاسيكية[2].

وهناك مظهر آخر من مظاهر عدم التعايش بين الحقول والجسيمات هو الظاهرة المعروفة باسم "إشعاع الجسم الأسود". لنتخيل جسماً نحافظ عليه في درجة حرارة معينة، فالإشعاع الكهرطيسي إذن في توازن مع الجسيمات. وكان رايلي **Rayleigh** وجينز **Jeans** قد وجدا بالحساب منذ عام 1900 أن الحقل ينبغي، في هذه الحالة، أن يسحب الطاقة كلها دون أن يكون هناك حدود تنتهي عندها هذه العملية. وفي ذلك شيء غير معقول فيزيائياً (سمي "الكارثة فوق البنفسجية": إذ تستمر الطاقة في الانتقال إلى الحقل بتواترات أعلى فأعلى دون توقف)، لكن الطبيعة نفسها لاتسلك مثل هذا السلوك غير الحذر. فقد وُجد تجريبياً أن سلوك الطاقة عند التواترات ***المنخفضة*** هو كما تنبأ به رايلي وجينز، أما عند التواترات ***العالية***، حيث تنبأا بكارثة، فلا ***يتزايد*** توزع الطاقة دونما حدود وإنما يهبط نحو الصفر مع تزايد التواتر. وفي كل درجة حرارة تكون قيمة الطاقة الأعظم عند تواتر (أي عند لون) معيّن تماماً (أنظر الشكل 6 - 2). (إن حمرة القضيب الحديدي الذي تحرك به النار، واللون الأصفر المبيض للحرارة التي تشعها الشمس ليسا في الحقيقة سوى مثالين مألوفين لما سبق ذكره).



الشكل 6-1: تُصدر الذرات في المادة المسخنة ضوءاً، غالباً مانتبين أن له فحسب تواترات محددة جداً. حتى ليمكن فصل التواترات المختلفة بعضها عن بعض باستخدام موشور فيتم الحصول عندئذ على سلسلة من الخطوط الطيفية المميزة للذرات التي تصدرها.



الشكل 6-2: كانت محاولة بلانك إيجاد تفسير للتباين بين شدة الإشعاع المحسوبة كلاسيكياً (رايلي وجينز) وتلك المرصودة تجريبياً لجسم حار (جسم أسود) هي التي قادته إلى بدايات النظرية الكمومية.

بدايات النظرية الكمومية

كيف يمكن حل هذه الأحاجي التي تطرحها الطبيعة؟ لاشك أن نظرية نيوتن الأصلية (الجسيمية) ***بحاجة*** لأن تدعم بأخذ حقل مكسويل بعين الاعتبار. هل يمكننا، ياترى، أن نفترض أن ***كل شيء*** هو حقل، وأن الجسيمات ماهي إلا "عقد" حقل صغيرة محدودة الحجم؟ إن لهذا الافتراض مصاعبه أيضاً، لأن الجسيمات تستطيع عندئذٍ أن تغير أشكالها باستمرار متلوية ومتذبذبة متخذة عدداً لانهاية له من الأشكال. لكن هذا ليس مانلاحظه، ففي العالم الفيزيائي تكون جسيمات النوع نفسه كلها ***متماثلة***. فأي إلكترونين، على سبيل المثال، يماثل أحدهما الآخر تماماً. وحتى الذرات أو الجزيئات لايمكنها أن تتخذ سوى عدد محدود من الترتيبات المختلفة[3]. فلو أننا افترضنا أن الجسيمات مصنوعة من ***حقول*** لاحتاج الأمر إلى شيء ما جديد يمكّن الحقول من اتخاذ مميزات متفردة.

وفي عام 1900 اقترح الفيزيائي الألماني اللامع، إنما المحافظ والحذر، ماكس بلانك Max Planck، فكرة ثورية هدفها "تخميد" الأنماط عالية التواتر في إشعاع "الجسم الأسود"، وذلك بافتراض أن الاهتزازات الكهرطيسية لاتصدر إلا على شكل "كمّات" (quanta) تتعلق طاقة كل منها E بالتواتر ν بعلاقة محددة تماماً هي:

$$E = h\nu$$

حيث h هي ثابتة أساسية جديدة من ثوابت الطبيعة تعرف الآن باسم ***ثابتة بلانك***. ومما يثير الدهشة أن بلانك استطاع بهذا الشيء النظري الفظيع أن يحصل، بالنسبة لعلاقة تغير شدة الإشعاع بدلالة التواتر، على صيغة تتفق تماماً مع تغير الشدة المرصود تجريبياً، وهي مايعرف باسم ***قانون بلانك في الإشعاع***. (إن ثابتة بلانك صغيرة جداً بالنسبة لمقاييسنا اليومية، فهي

تبلغ نحواً من 6.6×10^{-34} جول ثانية). لم يلق هذا المجهود الفذّ، الذي تمكن بلانك بواسطته كشف أولى ومضات النظرية الكمومية القادمة، إلا اهتماماً ضئيلاً من جانب زملائه. وظل الحال كذلك إلى أن قدم أينشتين اقتراحاً مدهشاً آخر مفاده أن الحقل الكهرطيسي لايمكن أن ***يوجد*** إلا على شكل كمات إفرادية من نوع تلك التي قال بها بلانك! وإننا نذكر أن مكسويل وهرتز كانا قد بيّنا أن الضوء مؤلف من اهتزازات الحقل الكهرطيسي. ولكن هاهو أينشتين يدّعي - كما أكد نيوتن قبل أكثر من قرنين - أن ***الضوء*** يجب أن يكون، في نهاية المطاف، عبارة عن ***جسيمات***! (كان العالم النظري والتجريبي الإنكليزي اللامع توماس يونغ Thomas Young قد أثبت، في بداية القرن التاسع عشر، أن الضوء يتألف من أمواج).

ترى كيف يمكن أن يكون الضوء مؤلفاً، في الوقت ذاته، من جسيمات ومن اهتزازات الحقل الكهرطيسي؟ إن هذين المفهومين يبدوان متعارضين قطعاً. ومع ذلك فإن بعض الحقائق التجريبية تشير بوضوح إلى أن الضوء هو جسيمات، بينما يشير بعضها الآخر، بوضوح أيضاً، إلى أنه أمواج. وفي عام 1923 قام الارستقراطي الفرنسي الفيزيائي النافذ البصيرة الأمير لوي دوبروي Louis de Broglie بجعل الأمور أكثر التباساً حين اقترح في أطروحته لنيل شهادة الدكتوراة (التي قدمها لأينشتين لأخذ موافقته عليها) أن ينظر إلى جسيمات ***المادة*** نفسها أنها تسلك في بعض الأحيان سلوك الأمواج! وكانت العلاقة التي اقترحها دوبروي، والتي تعطي تواتر الموجة ν لأي جسيم كتلته m تنسجم مع علاقة بلانك. فإذا قورنت بعلاقة أينشتين الشهيرة $E=mc^2$ حصلنا على العلاقة التالية التي تربط التواتر ν بالكتلة m:

$$h\,\nu = E = mc^2$$

وهكذا إذن، ووفقاً لاقتراح دوبروي، لايعود الانقسام بين الجسيمات والحقول، الذي كان أحد مظاهر النظرية الكلاسيكية، انقساماً تحترمه الطبيعة. وبالفعل فإن أي شيء يهتز، كائناً ماكان، بتواتر ν لايمكن أن يوجد إلا على شكل مضاعفات الوحدة نفسها من الكتلة $h\nu/c^2$. أي أن الطبيعة تحتال، بطريقة ما، لأن تبني عالماً منسجماً تكون ***فيه الجسيمات والحقول المهتزة هي الشيء ذاته!*** أو، بصورة أدق، أن عالمها مؤلف من مكوِّنات أكثر رهافة بحيث أن كلمتيّ "جسيم" و "موجة" لاتفيدان إلا بإعطائنا صورة ملائمة مجتزأة.

لقد وظف الفيزيائي الدانمركي، أكبر أعلام الفكر العلمي في القرن العشرين، نيلس بور، علاقة بلانك توظيفاً لامعاً (عام 1913). كان بور قد وضع قاعدة لاتأخذ بمقتضاها قيمة ***الاندفاع الزاوي*** (انظر الصفحة 208) للإلكترونات الدائرة حول النواة إلا مضاعفات صحيحة من $h/2\pi$، هذا المقدار الذي وضع له ديراك فيما بعد الرمز الملائم:

$$\hbar = h/2\pi$$

وهكذا تكون القيم المسموحة الوحيدة للاندفاع الزاوي للإلكترون (بالنسبة لأي محور كان) هي:

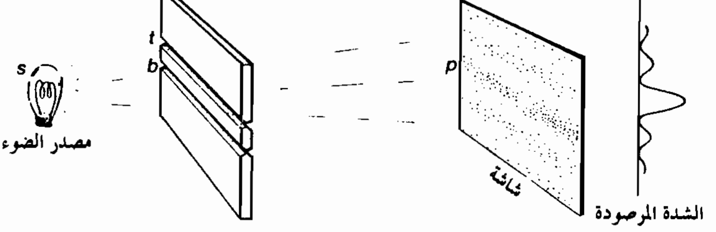
$$0, \hbar, 2\hbar, 3\hbar, 4\hbar, \ldots$$

وحين استُكمل نموذج "المنظومة الشمسية" بهذه الطريقة أصبح بالإمكان بوساطته حساب، وبدقة كبيرة، العديد من مستويات الطاقة المستقرة وكذلك إيجاد تلك القواعد "الغريبة" التي تعطي تواترات الخطوط الطيفية، والتي تخضع لها الطبيعة *بالفعل!*

وعلى الرغم من نجاح فرضية بور المذهل في تفسير الخطوط الطيفية، إلا أنها لم تشكل سوى نوع من النظرية "الكشكولية" المؤلفة من قطع وأجزاء، والتي أصبحت تدعى "النظرية الكمومية القديمة". أما النظرية الكمومية كما نعرفها اليوم فقد نشأت من منهجين مستقلين، ظهرا فيما بعد، بدأهما فيزيائيان مشهوران: أحدهما ألماني هو فرنر هايزنبرغ Werner Heisenberg والآخر نمساوي هو إرفين شرودنغر. وقد بدا، في البداية، أن طريقتيهما ("ميكانيك المصفوفات" في عام 1925 و "الميكانيك الموجي" في عام 1926 على الترتيب) مختلفتان تماماً، لكن سرعان ماتبين أنهما متكافئتان. وقد برهن بعد ذلك بقليل العالم النظري البريطاني العظيم بول أدريان موريس ديراك أنهما تنضويان في إطار أعم وأشمل. وسوف نلقي نظرات خاطفة في الأقسام التالية على هذه النظرية وعلى نتائجها غير العادية.

تجربة الشقين

سنصف الآن تجربة نموذجية أساسية من تجارب ميكانيك الكم نجعل فيها حزمة من الإلكترونات، أو الضوء، أو أي نوع آخر من "الجسيمات-الأمواج" تسقط على حاجز أُحدث فيه شقان ضيقان و نتلقى مايعبر الشقين على شاشة موضوعة خلف الحاجز (الشكل 6-3). ولكي تكون الأمور محددة سوف نستخدم *الضوء* ونسمي كمات الضوء "فوتونات" كما هو مصطلح على تسميتها عادة. وعلى الشاشة تظهر أكثر المظاهر وضوحاً لكون الضوء ***جسيمات*** (أي فوتونات). فالضوء يصل الشاشة على شكل وحدات من الطاقة منفصلة ومتموضعة بحيث أن طاقة كل وحدة من الوحدات تتعلق بتواتر الضوء بصورة وحيدة لاتتغير طبقاً لعلاقة بلانك $E = h\nu$. ولايمكن مطلقاً أن نتلقى طاقة "نصف" فوتون فقط (أو أي جزء آخر منه). فتلقّي الضوء على الشاشة هو ظاهرة "الكل أو لاشيء" من واحدات الفوتونات. فلا يمكن أبداً رصد سوى عدد كامل من الفوتونات.



الشكل 6-3: تجربة شقي يونغ باستخدام ضوء وحيد اللون

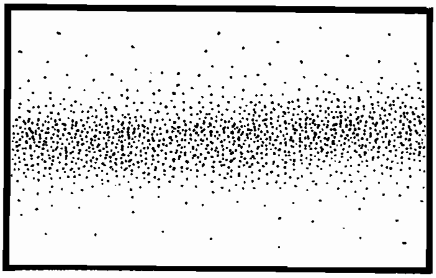
إلا أن الضوء يبدي سلوكاً ***موجياً*** بمجرد أن تمر الفوتونات عبر الشقين. لنفترض، في البداية، أن شقاً واحداً فقط مفتوح (وأن الثاني مغلق). فما إن يمر الضوء من الشق حتى ينتشر منفرجاً – وهي الظاهرة المعروفة ***بالانعراج*** diffraction (أو الحيود) وهي إحدى مظاهر انتشار الأمواج – وعلى الرغم من هذا يستطيع المرء أن يتابع تمسكه بالصورة الجسيمية بسهولة فيتصور وجود تأثير ما على الفوتونات من حواف الشق يسبب انحرافها عن مسارها الأصلي بمقدار عشوائي إلى هذه الناحية أو تلك. وطالما كانت شدة الضوء المار من الشق "معقولة" (أي طالما كان عدد الفوتونات كبيراً) تظهر إضاءة الشاشة منتظمة. لكن يكفي أن نخفض شدة الضوء تخفيضاً شديداً حتى نتبين أن توزع الإضاءة مؤلف في الواقع من بقع مفردة – بما يتفق مع صورة الضوء الجسيمية – واقعة حيث تصطدم الفوتونات المفردة بالشاشة. ومامظهر الإضاءة المنتظمة إذن سوى أثر إحصائي يعود إلى كون عدد الفوتونات المساهمة كبيراً جداً (الشكل 6-4). (ولإعطاء فكرة عن مرتبة كبر أعداد الفوتونات، فإن مصباحاً كهربائياً استطاعته 60 واطاً يصدر نحواً من 100.000.000.000.000.000.000 فوتوناً في الثانية!) فالفوتونات تنحرف إذن بصورة عشوائية لدى عبورها الشق باحتمالات تختلف باختلاف زوايا الانحراف مما يؤدي إلى توزع الإضاءة الذي نشاهده.

لاتبرز المشكلة الأساسية في التصور الجسيمي للضوء إلا حين نفتح الشقين معاً. لنفترض أن الضوء هو ضوء مصباح الصوديوم بحيث أنه ذو لون صاف (هنا أصفر) لايشوبه غيره من الألوان، وهو مايصطلح على تسميته تقنياً بالضوء "وحيد اللون"، ويراد بذلك أنه ذو طول موجة، أو تواتر، وحيد معين. وهذا يعني، في الصورة الجسيمية، أن لفوتونات الضوء كلها الطاقة نفسها. في مثالنا هذا يبلغ طول الموجة نحواً من 5×10^{-7} متراً. ليكن عرض كل من الشقين نحو 0.001 ملمتراً، وليكن البعد بينهما 0.15 ملمتراً، ولتكن الشاشة على بعد متر واحد تقريباً عنهما. فإذا كانت شدة الضوء قوية بصورة معقولة حصلنا على إضاءة منتظمة للشاشة إنما تحتوي على تموج يدعى أهداب ***التداخل*** بحيث نرى على طول الشاشة، بالقرب من مركزها، عصابات عرضها ثلاث ملمترات تقريباً (الشكل 6-5). ربما كان لنا أن نتوقع أن فتح الشق الثاني سيؤدي ببساطة إلى مضاعفة شدة الإضاءة على الشاشة. والواقع أن هذا هو مايحدث فيما لو أخذنا بالحسبان الإضاءة ***الكلية***. إلا أننا نرى أن شكل الإضاءة التفصيلي يختلف تماماً عمّا كان عليه في حالة فتح شق واحد. ففي نقاط معينة من الشاشة، حيث الإضاءة أعظمية، تكون شدة الإضاءة أقوى ***بأربع*** مرات، وليس بمرتين، مما كانت عليه في حالة الشق الواحد. وفي نقاط أخرى، حيث الإضاءة أدنى ماتكون، تنخفض الشدة إلى الصفر. ولعل نقاط الشدة المعدومة هذه هي التي تثير أعظم الأحاجي بالنسبة للصورة الجسيمية. فهذه نقاط كان بإمكان الفوتونات أن تصل إليها دون أدنى صعوبة حين لم يكن سوى أحد الشقين مفتوحاً. أما حين يفتح الشق الثاني فيصبح فجأة من ***المحظور*** على الفوتونات أن تسلك سلوكاً كان

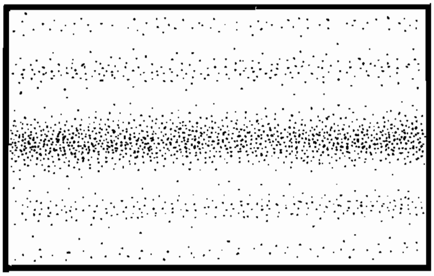
ممكناً لها أن تسلكه من قبل. فكيف يحدث أننا بمجرد فتح طريق ثان يمكن للفوتون أن يسلكه نكون عملياً قد **منعناه** من سلوك أي من الطريقين؟

لنأخذ الآن طول موجة الفوتون مقياساً لقده ولنفرض أن أحد الشقين يبعد عن الآخر بحسب هذا المقياس بما يعادل 300 مقياساً فوتونياً (بينما يبلغ عرض كل من الشقين طولين موجيين فقط). فكيف يمكن للفوتون، والحالة هذه، أن "يعرف" عند عبوره أحد الشقين، فيما إذا كان الشق الآخر مفتوحاً أم لا؟ في الحقيقة تحدث ظاهرة "انعدام" و "اشتداد" الضوء هذه دون أن تكون هناك، من حيث المبدأ، حدود عليا للمسافة التي يمكن أن يبعد بها أحد الشقين عن الآخر.

يبدو أن الضوء، بمجرد أن يمر خلال الشق (أو الشقين)، يسلك سلوك ***الموجة*** وليس سلوك الجسيم، إلا أن "انعدام" الشدة هذا - وهو ما يُعرف ***بالتداخل الهدّام destructive interference*** - هو ظاهرة مألوفة في كونها خاصة من خواص الأمواج العادية. فإذا كان بإمكان الموجة أن تسلك طريقين، وإذا جُعل الطريقان متاحين كليهما لها، أصبح من الممكن أن يلغي أحدهما الآخر. وقد بينتُ في الشكل 6-7 كيف يمكن أن يحدث ذلك. فحين يلتقي جزء الموجة المار عبر أحد الشقين بالجزء المار عبر الشق الآخر يقوّي أحدهما الآخر إذا كانا "***متفقين في الطور***" (وبتعبير آخر إذا كان يتم حدوث ذروتي الجزأين وحضيضيهما معاً في آن واحد)، ولكنهما يُفنيان بعضهما بعضاً إذا كانا "متعاكسين في الطور" تماماً (أي إذا كان أحد الجزأين في الذروة كلما كان الآخر في الحضيض). ففي تجربة الشقين تكون المناطق المضيئة على الشاشة هي الأماكن التي يكون الفرق بين بعديها عن الشقين مساوياً عدداً صحيحاً من الأطوال الموجية بحيث يتفق فيها حدوث الذروتين معاً وكذلك حدوث الحضيضين، أما المناطق المظلمة فهي الأماكن التي يكون فرق بعديها عن الشقين في المنتصف بحيث تلتقي ذروة أحد الجزأين بحضيض الجزء الآخر، ويلتقي الحضيض بالذروة.

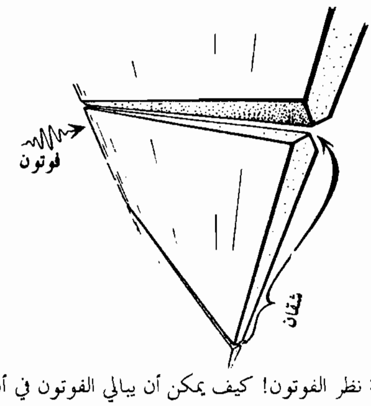


الشكل 6-4: شكل الإضاءة على الشاشة حين لايكون سوى واحد من الشقين مفتوحاً - توزع بقع دقيقة منفصلة.

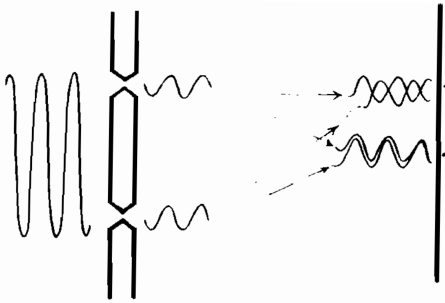


الشكل 6-5: شكل الإضاءة حين يكون الشقان مفتوحين ـ توزع متموج لبقع منفصلة.

ليس هناك مايحيّر في مرور موجة عادية جهرية macroscopic كلاسيكية عبر شقين في آن واحد: فما الموجة، في نهاية الأمر، سوى "اضطراب" إما في وسط مستمر (وهذه هي حالة الحقل) أو في مادة مؤلفة من عدد كبير جداً من الجسيمات الدقيقة الشبيهة بالنقاط. ويمكن لهذا الاضطراب أن يمر جزء منه عبر أحد الشقين وأن يمر جزؤه الآخر عبر الشق الثاني. إلا أن الأمر هنا مختلف كل الاختلاف: فكل فوتون، بمفرده، يسلك سلوك الموجة بصورة مستقلة تماماً! وبمعنى ما يمر كل جسيم عبر الشقين في *آن واحد* ويتداخل مع نفسه! لأنه يكفي أن تخفض شدة الضوء الكلية تخفيضاً كافياً لكي يضمن المرء عدم مرور أكثر من فوتون واحد في لحظة معينة بجوار الشقين. وإن ظاهرة التداخل الهدّام التي يلغي فيها، بطريقة ما، سبيلان ممكنان أمام الفوتون أحدهما الآخر كاحتمالين محققين، هي ظاهرة تطبق على الفوتونات *المفردة*. فإذا كان أحد السبيلين فقط مفتوحاً أمام الفوتون، أمكن للفوتون سلوكه. وإذا كان السبيل الآخر هو وحده المفتوح، أمكن للفوتون أن يسلكه بدلاً من الأول. أما إذا كانا **كلاهما** مفتوحين أمامه ألغى الإمكانان أحدهما الآخر بطريقة عجيبة، وبدا أنه ليس بإمكان الفوتون سلوك أي منهما!



الشكل 6-6: الشقان من وجهة نظر الفوتون! كيف يمكن أن يبالي الفوتون في أن يكون الشق الثاني، الذي يبعد نحواً من 300 "مقياساً فوتونياً"، مفتوحاً أم مغلقاً؟



الشكل 6-7: يمكننا أن نفهم، من خلال تصور موجي بحت، تناوب الأهداب المضيئة والمظلمة على الشاشة، وذلك بوساطة مفهوم تداخل الأمواج. لكن هذا التصور الموجي لايسمح لنا أن نفهم توزع البقع المنفصلة.

على القارئ أن يتوقف هنا قليلاً ليتمعن في أهمية هذه الظاهرة الخارقة. ليس مايحدث هو أن الضوء يسلك أحياناً سلوك الجسيمات ويسلك أحياناً أخرى سلوك الأمواج، بل إن ***كل جسيم فرد*** يتصرف بطريقة موجية، بصورة مستقلة تماماً، ***وإن الخيارات المختلفة المتاحة أمام جسيم ما يمكن، في بعض الأحيان، أن يلغي أحدها الآخر!***

ولكن، هل ينشطر الفوتون بالفعل إلى اثنين فيمر جزء منه عبر كل من الشقين؟ لاشك أن معظم الفيزيائيين يعارضون صياغة الأمر بمثل هذه الطريقة، وهم يصرون على أنه في حين أن السبيلين المفتوحين أمام الجسيم يجب أن يساهما كلاهما في الأثر النهائي، إلا أنهما مجرد خيارين ممكنين، وأنه لايجوز أن يُظن أبداً أن الجسيم ينشطر إلى اثنين لكي يستطيع المرور عبر الشقين. ومما يدعم وجهة النظر القائلة بأن الجسيم لايمر جزئياً عبر كل من الشقين هو التجربة المعدلة التي تختلف عن السابقة في أنه يوضع فيها ***كاشف جسيمات*** عند أحد الشقين. وبما أن الفوتون – أو أي جسيم آخر – حين يرصد فإنه يبدو دائماً وحدة كاملة، ولايظهر بصورة مجزَّأة، فإن الكاشف المستخدم في التجربة إما أن يكشف فوتوناً كاملاً أو لاشيء إطلاقاً. لكن حين نضع كاشفاً عند مدخل أحد الشقين – مما يسمح للمجرب أن يقول عبر أي الشقين مرّ الفوتون – تختفي صورة التداخل بأهدابها المظلمة والمضيئة على الشاشة. لذلك يبدو أنه لابد، لكي يحدث التداخل، من وجود "نقص في المعرفة"، أي إذا كنا لانعرف عبر أي الشقين مرّ الفوتون "بالفعل".

فللحصول على التداخل ينبغي أن يساهم الخياران ***كلاهما*** في الظاهرة، فهما "يجمعان" لبعضهما أحياناً – أي يقوّي أحدهما الآخر بمقدار هو ضعف مايمكن للمرء أن يتوقعه – و "يطرحان" من بعضهما أحياناً أخرى – بحيث يمكن لأحدهما أن "يلغي" الآخر بصورة محيّرة –

والحقيقة أن قواعد ميكانيك الكم تشير إلى حدوث أشياء أكثر غموضاً: إذ يمكن بالفعل جمع الخيارين أحدهما مع الآخر (ومن هنا تأتي النقاط المضيئة على الشاشة)، كما يمكن أن يُطرح أحدهما من الآخر (النقاط المظلمة)، ولكن يمكن كذلك أن يركّبا مع بعضهما بطرق أخرى لايمكن أن يقال فيها إلا أنها غريبة، مثل:

"الخيار A" زائد i × "الخيار B"

حيث "i" هي "الجذر التربيعي للناقص واحد" ($i = \sqrt{-1}$) الذي مر معنا في الفصل الثالث. (وهذه الإمكانية الأخيرة تعطي على الشاشة نقاطاً شدة الضوء فيها متوسطة). وفي الحقيقة يمكن لأي ***عدد عقدي*** أن يقوم بالدور نفسه الذي تقوم به "i" في "تركيب الخيارات"

ربما يذكر القارئ تنبيهي له، الذي ذكرته في الفصل الثالث، من أن الأعداد العقدية أساسية جداً في بنية ميكانيك الكم. فهذه الأعداد ليست مجرد فضول رياضي، وإنما فرضت نفسها على انتباه الفيزيائيين من خلال حقائق تجريبية مقنعة وغير متوقعة. ولابد لنا لفهم ميكانيك الكم من التآلف، ولو بأدنى حد، مع فكرة مفادها أنه يمكن التعبير عن الاحتمالات "بأوزان عقدية". دعونا اذن نرى فيما يلي ماذا يعني هذا؟

سعات الاحتمال

ليس من الضروري استخدام الفوتونات لوصف تجربة الشقين، فالإلكترونات أو أي نوع آخر من الجسيمات أو حتى الذرات الكاملة يمكن أن تفي بالغرض مثلها تماماً. بل يبدو أن قواعد ميكانيك الكم تؤكد أنه حتى كرات المضرب والفيلة يجب أن تسلك هذا السلوك الغريب نفسه، أي السلوك الذي يجمع بين الإمكانات المختلفة لتشكيل تراكيب ذات أمثال عقدية. إلاّ أننا مع ذلك لانرى أبداً في الواقع كرات مضرب أو فيلة ينضم بعضها إلى بعض بهذه الطريقة العجيبة. أمّا لماذا لانرى ذلك فهذا موضوع صعب، بل ومتناقض ولاأريد أن أتعرض له في الحال. أمّا الآن فدعونا نفترض ببساطة افتراضاً سنعمل وفقه، وهو أنه يوجد مستويان مختلفان للوصف الفيزيائي سوف ***أدعوهما المستوى الكمومي والمستوى الكلاسيكي***. ولن نستخدم هذه التراكيب الغريبة ذات الأمثال العقدية إلاّ في المستوى الكمومي. أما كرات المضرب والفيلة فهي أجسام تنتمي إلى المستوى الكلاسيكي.

إن المستوى الكمومي هو مستوى الجزيئات والذرات والجسيمات دون الذرية...إلخ، وهو مايسمى عادة مستوى الظواهر "ذات المقياس الصغير" جداً، أو المجهرية. إلاّ أن هذا "الصغر" لايتعلق في الحقيقة بالأبعاد الفيزيائية. وسوف نرى أن الآثار الكمومية يمكن أن تحدث على مسافات تبلغ أمتاراً أو حتى سنين ضوئية عديدة. وسيكون الأمر أقرب قليلاً إلى الصواب إذا قلنا أن ظاهرة ما تقع في "المستوى الكمومي" إذا كانت لاتتضمن سوى فروق صغيرة جداً في الطاقة (وسأحاول أن أكون أكثر دقة فيما بعد، وخاصة في الفصل الثامن). أما المستوى

الكلاسيكي فهو المستوى الجهري (أو العياني) الذي نتعامل معه بصورة مباشرة أكثر من غـيره. إنه المستوى الذي يصح فيه تصورنا المعتاد حول "جريان الأمور" والـذي نستطيع أن نستخدم فيه مفاهيمنا العادية حول الاحتمال. وسوف نرى أن الأعداد العقدية التي يجـب أن نستخدمها في المستوى الكمومي مرتبطة ارتباطاً وثيقـاً بالاحتمـالات الكلاسـيكية، علـى الرغـم مـن أنهـا ليست مماثلة لها تماماً. وسيكون من المفيد لنا، لكي نفهم هذه الأعـداد العقديـة، أن نتذكـر أولاً كيف تكون الاحتمالات الكلاسيكية.

لنفرض أننا أمام حالة كلاسيكية نتيجتها غير مؤكدة، وأننـا لانعـرف أي الخيـارين A أم B سوف يتحقق. يمكن وصف هذه الحالة بوساطة تركيب من الخيارين A و B لكل منهما "ثقل" معين:

P × "الخيار A"   زائد   q× الخيار B

حيث p هو احتمال حدوث A و q هو احتمال حدوث B. (نعلم أن الاحتمـال هـو عـدد حقيقي محصور بين الصفر والواحد، وأن احتمال الحادث يسـاوي 1 يعـني أن "حدوثـه مؤكـد" وأمـا احتمالـه يسـاوي الصفـر فيعـني أن "عـدم حدوثـه مؤكـد". وأمّـا الاحتمـال ½ فيعـني أن "احتمال حدوثه وعدمه متساويان"). فإذا كان A و B هما الخياران ***الوحيدان*** وجب أن يكون مجموع احتماليهما مساوياً 1:

$$p + q = 1$$

أمّا إذا كانت هناك خيارات أخرى، غير A و B، كان المجموع السابق p + q أقـل مـن 1. وتمثل النسبة p/q في هـذه الحالـة ***نسبة*** احتمـال حـدوث A إلى احتمـال حـدوث B. ويكـون الاحتمـال الفعـال لحـدوث A، (أو لحـدوث B)، إذا لم نـأخذ بعـين الاعتبـار سـوى الخيـارين A و B، هو p/(p+q)، (أو q/(p+q)) على الـترتيب. وهـذا المفهـوم، الصـالح كذلـك في حالـة كون p + q أكبر من الواحد، يمكن أن يكون مفيداً حين يتعلق الأمر، على سبيل المثال، بتجربة تتكرر مرات كثيرة بحيث يكون p عدد مرات حدوث "A" و q عدد مرات حدوث "B". أما إذا كان p + q = 1 فيقال أن الاحتمالين p و q ***مستنظمان***، وفي هذه الحالة يمثّل كـل مـن p و q الاحتمال الحقيقي وليس مجرد نسبة احتمالين.

تبـدو الاجـراءات المسـتخدمة في النظريـة الكموميـة ***مشـابهة*** لتلـك المسـتخدمة في حالـة الاحتمالات إلا أنها تختلف عنها في أن p و q يصبحان عددين عقديين - وأفضّل أن أرمز لهمـا بالحرفين w و z بدلاً من p و q:

w × " الخيار A   زائد   z × "الخيار B "

ماهو المعنى الذي سنعطيه لكل من w و z؟ إنهما بالتأكيد ليسا احتمالين عاديين، (أو نسـبة احتمالين) لأن كلاً منهما يمكن أن يكون سالباً أو عقديـاً. لكـن w و z يسـلكان في كثـير مـن الأمور سلوك الاحتمالات. ويسمى كل منهما ***سعة الاحتمـال*** أو ببسـاطة ***السعة***. وعـدا عـن

ذلك فكثيراً ماتستخدم التعابير نفسها المستخدمة في الاحتمالات مثل قولنا "هناك سعة w لحدوث A وسعة z لحدوث B". لكنها، في حقيقة الأمر، ليست احتمالات، وإن كنا سنحاول في الوقت الراهن أن نتعامل معها كما لو كانت كذلك - أو نعتبر أنها المقابل الكمومي للاحتمالات.

دعونا نتساءل كيف تجري الأمور مع الاحتمالات ***العادية***؟ لنتخيل جسماً جهرياً، وليكن كرة (طابة) مثلاً قذفت باتجاه فتحتين لتصطدم بالحاجز خلفهما بعد أن تعبر من خلال واحدة منهما. وهذه التجربة مماثلة لتجربة الشقين التي سبق وصفها (أنظر الشكل 6-3) سوى أن كرة جهرية عادية حلت محل الفوتون في التجربة السابقة. ليكن احتمال وصول الكرة إلى الفتحة العلوية t، بعد قذفها من الموضع s، هو P(s,t)، واحتمال وصولها إلى الفتحة السفلية b هو P(s,b). وإذا اخترنا نقطة معينة p على الحاجز كان هناك احتمال P(t,p) أن تصل الكرة إلى هذه النقطة المعينة p بعد مرورها من الفتحة t، واحتمال آخر P(b,p) أن تصل إلى p بعد مرورها من b. فلو كانت الفتحة العلوية t هي وحدها المفتوحة لكان احتمال وصول الكرة إلى p عبر t بعد قذفها هو العدد الذي نحصل عليه من ضرب احتمال عبورها من s إلى t باحتمال وصولها من t إلى p:

$$P\,(t,p)\times P\,(s,t)$$

وبصورة مماثلة، لو كانت الفتحة السفلية هي وحدها المفتوحة لكان احتمال وصول الكرة من s إلى p هو:

$$P(b,p)\times P\,(s,b)$$

أما حين تكون ***الفتحتان*** مفتوحتين فإن احتمال وصول الكرة من s إلى p عبر t يبقى نفسه كما كان، P (s,t) × P (t,b)، تماماً كما لو أن الفتحة t هي وحدها المفتوحة، واحتمال أن تصل الكرة من s إلى p عبر b يبقى كذلك كما في السابق P (s,b) × P (b,p) بحيث أن الاحتمال الكلي لوصول الكرة من s إلى p هو مجموع هذين الاحتمالين:

$$P\,(s,p) = P(s,t)\times P(t,p)+ P(s,b) \times P(p,b)$$

وفي المستوى ***الكمومي*** تبقى هذه القواعد كما هي سوى أن هذه ***السعات العقدية*** الغريبة هي التي تقوم هنا بالدور الذي كانت تقوم به الاحتمالات. ففي تجربة الشقين التي بحثناها سابقاً تكون السعة لأن يصل الفوتون إلى الشق العلوي t قادماً من المنبع s هي A (s,t). وتكون السعة لكي يبلغ النقطة p في الشاشة بعد عبور الشق t هي A (t,p)، وبضرب هاتين السعتين نحصل على:

$$A\,(t,p)\times A\,(s,t)$$

وهي السعة لأن يبلغ الفوتون النقطة p عبر الشق t. وكما في حالة الاحتمالات هذه العبارة صحيحة حين يكون الشق العلوي مفتوحاً بغض النظر عن كون الشق السفلي b مفتوحاً أم لا.

وبالطريقة ذاتها، إذا كان b مفتوحاً، تكون السعة لكي يصل الفوتون من s إلى p ماراً عبر b (بغض النظر عن كون t مفتوحاً أم لا) هي:

$$A(b,p) \times A(s,b)$$

فإذا كان الشقان مفتوحين معاً، كانت السعة الكلية لأن يصل الفوتون إلى p قادماً من s هي:

$$A(s,p) = A(s,t) \times A(t,p) + A(s,b) \times A(b,p)$$

هذا كله جيد جداً، ولكنه لن يفيدنا كثيراً ما لم نعرف كيف نعطي معنى لهذه السعات الكمومية حين يُضَخَّم الأثر الكمومي حتى يبلغ المستوي الكلاسيكي. إذ يمكن أن يكون لدينا، مثلاً، كاشف فوتونات أو ***خلية كهرضوئية*** موضوعة في p توفر تضخيم حادثة تجري في المستوى الكمومي – ولنقل وصول فوتون إلى p مثلاً – فتحوله إلى حدث قابل للرصد كلاسيكياً – ولتكن "إشارة" صوتية مثلاً ـ .(لو كانت الشاشة لوح تصوير يترك عليها الفوتون بقعة مرئية لسارت الأمور بشكل جيد مماثل، لكنني أفضّل، توخياً للوضوح، استخدام خلية كهرضوئية.). هناك ***احتمال*** فعلي (وليس "سعة" من هذه السعات الغامضة) مرتبط بحدوث هذه الإشارة الصوتية. والسؤال هو كيف لنا أن ننتقل من السعات إلى الاحتمالات حين ننتقل من المستوى الكمومي إلى المستوى الكلاسيكي؟ لقد تبين أنه توجد قاعدة لأجل ذلك هي في الوقت ذاته جميلة وغامضة.

وهذه القاعدة هي أنه ينبغي للحصول على الاحتمال الكلاسيكي أن نحسب ***مربع طويلة*** العدد العقدي الممثِّل للسعة الكمومية. ولكن ماذا يعني "مربع الطويلة"؟ لنعد إلى الشرح الذي أوردناه (في الفصل الثالث، ص 124) حول تمثيل الأعداد العقدية في المستوي العقدي (مستوي آرغان). إن الطويلة $|z|$ لعدد عقدي z هي المسافة بين المبدأ (النقطة o) والنقطة التي تمثل العدد z. ومربع الطويلة $|z|^2$ هو ببساطة مربع هذا العدد. وهكذا، إذا كان:

$$z = x + iy$$

حيث x و y هما عددان حقيقيان، فإن مربع الطويلة المطلوب هو، حسب نظرية فيثاغورس، (لأن الخط بين o و z هو وتر المثلث القائم zxo):

$$|z|^2 = x^2 + y^2$$

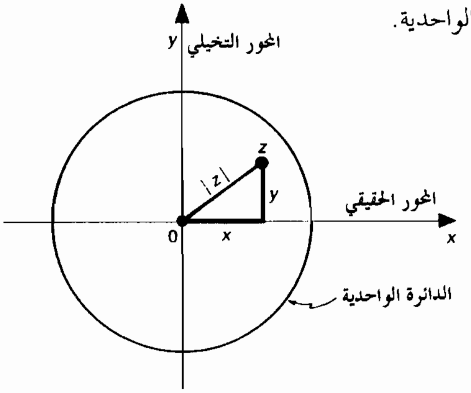
لنلاحظ أنه للحصول على احتمال مستنظم يجب أن تكون قيمة $|z|^2$ محصورة بين 0 و 1. وهذا يعني أن النقطة z يجب أن تقع، حين تكون السعة مستنظمة، في مستوي آرغان داخل ***الدائرة الواحدية*** (التي نصف قطرها يساوي 1، أنظر الشكل 6-8). ولكن يحدث أحياناً أن ننظر في تراكيب مثل:

$$w \times \text{الخيار } A + z \times \text{الخيار } B$$

حيث w و z ***متناسبان*** فقط مع سعتي الاحتمال. ففي مثل هذه الحالة ليس من الضروري أن تقع النقطة الممثلة لهذا التركيب داخل الدائرة الواحدية. فلكي تكون هاتان السعتان ***مستنظمتين*** (ويمكن إذن حساب الاحتمالات الفعلية منهما) يجب أن يكون بمجموع مربعي طويلتيهما مساوياً الواحد:

$$|w|^2 + |z|^2 = 1$$

أما إذا لم يكن هذا الشرط محققاً كانت السعتان الفعليتان المقابلتان للخيارين A و B هما على الترتيب: $w/\sqrt{(|w|^2 + |z|^2)}$ و $z/\sqrt{(|w|^2 + |z|^2)}$ وهما تقابلان نقطتين واقعتين فعلاً داخل الدائرة الواحدية.



الشكل 6-8: تمثيل سعة الاحتمال، في مستوي آرغان، بنقطة z داخل الدائرة الواحدية. يمكن أن يصبح مربع بُعد هذه النقطة عن المبدأ، $|z|^2$ ، احتمالاً فعلياً حين تضخّم الآثار الكمومية حتى المستوي الكلاسيكي.

وهكذا نرى أن سعة الاحتمال ليست في الحقيقة مثل الاحتمال إنما هي أشبه "بالجذر التربيعي العقدي" للاحتمال. فما هي نتيجة ذلك بالنسبة لتضخيم الآثار الكمومية حتى بلوغها المستوي الكلاسيكي؟ لنتذكر أننا لدى التعامل مع الاحتمالات والسعات كنا نحتاج أحياناً لضرب بعضها ببعض وأحياناً أخرى لجمع بعضها مع بعض. ولنلاحظ قبل كل شيء أن الانتقال من القواعد الكمومية إلى القواعد الكلاسيكية لايسبب أي مشكلة بالنسبة لعملية ***الضرب***. والسبب في ذلك هو الحقيقة الرياضية الشهيرة القائلة أن مربع طويلة جداء عددين عقديين يساوي جداء مربعي طويلتيهما:

$$|zw|^2 = |z|^2 \, |w|^2$$

(تنتج هذه المساواة مباشرة من التمثيل الهندسي لجداء عددين عقديين، كما هو مبيّن في الفصل الثالث؛ ويمكنكم أن تجربوا الحصول على هذه النتيجة انطلاقاً من تمثيل z و w كما يلي: $z = x + iy$ و $w = u + iv$، وستحصلون على النتيجة السابقة نفسها بالطبع ولكن مع شعوركم بحدوث أعجوبة صغيرة!)

ينتج مما سبق أنه إذا لم يكن هناك سوى سبيل واحد ممكن أمام الجسيم، كأن لايكون سوى شق واحد فقط (وليكن الشق t) مفتوحاً في تجربة الشقين، أمكننا مناقشة الأمر "بالطريقة الكلاسيكية": ويتبين عندئذٍ أن الاحتمالات تكون هي نفسها سواء أأجري كشف إضافي للجسيم في النقطة الوسطية (t) أم لا* . ويمكننا عندئذٍ إما أن نأخذ مربعي الطويلتين في كل من المرحلتين، أو مربع جداء الطويلتين، فالنتيجة تبقى ذاتها:

$$|A\ (s,t)|^2 \times |A\ (t,p)|^2 = |A\ (s,t) \times A\ (t,p)|^2$$

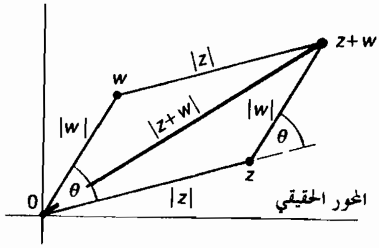
أمّا إذا وُجد أكثر من سبيل واحد مفتوحاً أمام الجسيم (مثلاً إذا كان كلا الشقين مفتوحين) وجب أن نشكّل ***مجموعاً***، وهنا تبدأ الصفات الخاصة بميكانيك الكم بالظهور. فحين نشكل مربع طويلة المجموع w + z لعددين عقديين z و w لانحصل عادةً على مجموع مربعي طويلتيهما؛ إذ يظهر حد "تصحيحي" إضافي:

$$|w + z|^2 = |w|^2 + |z|^2 + 2\ |w|\ |z| \cos \theta$$

وتمثل θ هنا الزاوية بين المستقيمين الواصلين بين المبدأ والنقطتين z و w في مستوي آرغان (انظر الشكل 6-9). (تذكّر أن تجب (cos) الزاوية هو نسبة الضلع المجاور للزاوية إلى الوتر في المثلث القائم). وبإمكان القارئ الجاد أن يستخرج هذه العلاقة بنفسه مستخدماً القواعد المثلثاتية المذكورة في الفصل الثالث. والحقيقة أن هذه العلاقة ليست سوى "قاعدة التجب" المعروفة إنما متنكرة قليلاً!). إن حد التصحيح $2|w|\ |z| \cos \theta$ هو سبب ***التداخل الكمومي*** بين الخيارات الكمومية. وتتراوح قيمة $\cos \theta$ بين 1- و 1. فحين تكون $\theta = 0°$ يكون $\cos \theta = 1$ ويقوّي الخياران أحدهما الآخر بحيث يكون الاحتمال أكبر من مجموع الاحتمالين المفردين. أما حين تكون $\theta = 180°$ يكون $\cos \theta = -1$ ويلغي الخياران أحدهما الآخر مما يؤدي إلى احتمال كلي أصغر من مجموع الاحتمالين المفردين (تداخل هدّام). وحين تكون $\theta = 90°$ يكون $\cos \theta = 0$ ونحصل على حالة متوسطة حيث يتم جمع الاحتمالين فقط. أما حين يتعلق الأمر بجملة كبيرة أو معقدة فتكون قيمة الحد التصحيحي معدومة "وسطياً" – لأن القيمة "الوسطية" لِـ $\cos \theta$ هي الصفر – وتكون القواعد العادية لحساب الاحتمال هي المطبقة. أما في المستوى الكمومي فالأمر مختلف ويكون الحد التصحيحي سبب التداخل الكمومي.

---

* يجب أن يجري هذا الكشف بطريقة لايؤثر فيها في مرور الجسيم عبر t. ويمكن التوصل إلى تحقيق هذا بوضع كواشف في مواضع أخرى، حول S، بحيث ***يستدل*** على مرور الجسيم عبر t حين لاتعطي هذه الكواشف أية إشارة.



الشكل 6-9: يجب إضافة الحد التصحيحي $2|w||z| \cos \theta$ إلى مجموع مربعي طويلتي السعتين |w| و |z| لدى جمعهما.

لنعد إلى تجربة الشقين في الحالة التي يكونان فيها مفتوحين كلاهما. إن سعة وصول الفوتون إلى p هو المجموع w + z حيث:

$$z = A(s,b) \times A(b,p) \qquad w = A(s,t) \times A(t,p)$$

وتكون ***أكثر النقاط إضاءة*** على الشاشة، هي تلك التي يكون من أجلها z = w، (أي $\theta = 0$ وإذن $\cos \theta = 1$)، أي:

$$|w+z|^2 = |2w|^2 = 4|w|^2$$

فالاحتمال يساوي أربعة أضعاف الاحتمال $|w|^2$ المقابل لكون أحد الشقين فقط مفتوحاً. وتكون شدة الضوء كذلك أقوى ***بأربع مرات*** حين يتعلق الأمر بعدد كبير من الفوتونات – وهذا يتفق مع المشاهدة. أما النقاط المظلمة على الشاشة فهي التي يكون من أجلها w = -z (أي $\theta = \pi$ وإذن $\cos \theta = -1$) وإذن:

$$|w + z|^2 = |w - w|^2 = 0$$

وهذه حالة التداخل الهدام (الاحتمال ***معدوم***) مما يتفق أيضاً مع المشاهدة. أما النقاط التي تتوسط تماماً الحالتين السابقتين فيكون من أجلها w = iz أو w = -iz (أي $\theta = \pi/2$ وإذن $\cos \theta = 0$) وإذن:

$$|w + z|^2 = |w \pm iw|^2 = |w|^2 + |w|^2 = 2|w|^2$$

مما يؤدي إلى إضاءة شدتها ***ضعفا*** الشدة المقابلة لشق واحد مفتوح (وهذا هو الحال فيما لو كان الأمر يتعلق بجسيمات كلاسيكية). وسوف نرى فيما بعد كيف تحسب مواضع الأمكنة المضيئة والمظلمة والمتوسطة الإضاءة.

بقيت ملاحظة أخيرة: حين يكون كلا الشقين مفتوحين تكون سعة وصول الجسيم إلى p عبر t هي بالفعل $w = A(s,t) \times A(t,p)$ لكن لايمكن مع ذلك اعتبار أن مربع طويلتها $|w|^2$ هو احتمال مرور الجسيم "فعلاً" عبر الشق العلوي t ليصل إلى p. لأن مثل هذا الاعتبار سيقودنا إلى نتائج لامعنى لها، وخاصة إذا كانت p هي إحدى النقاط المظلمة على الشاشة. أمّا إذا

اخترنا أن "نكشف" وجود الفوتون في t، وذلك بتكبير أثر وجوده (أو غيابه) في تلك النقطة إلى المستوى الكلاسيكي، أمكننا عندئذٍ استخدام $|A(s,t)|^2$ بمثابة احتمال وجود الفوتون بالفعل في t. لكن كشف الفوتون في t يزيل صورة التداخل الذي ينبغي لحدوثه أن يبقى مرور الفوتون عبر الشقين في ***المستوى الكمومي*** بحيث أن كلا الخيارين ينبغي أن يساهما في العملية فيقوي، أحياناً، أو يلغي، أحياناً أخرى، أحدهما الآخر. ففي ***المستوى الكمومي*** توصف الخيارات بالسعات وليس بالاحتمالات.

حالة الجسيم الكمومية

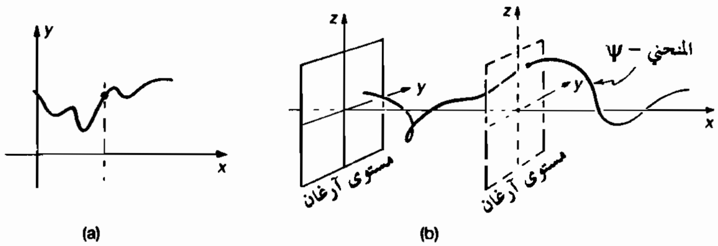
ترى أي نوع من الصور هذه التي يمكن أن نستحصلها من كل هذا عن "الحقيقة الفيزيائية" على المستوى الكمومي، حيث ينبغي أن توجد معاً "مختلف الخيارات" المتاحة للجملة، وأن كل خيار يساهم بوزن معبر عنه بعدد عقدي؟ يجد العديد من الفيزيائيين أنفسهم قانطين من إيجاد مثل هذه الصورة إطلاقاً. ويرون أننا يجب أن نكون سعداء بمجرد أن النظرية تتيح لنا حساب الاحتمالات، فالنظرية الكمومية، بحسب رأيهم، لاتقدم صورة موضوعية للعالم الفيزيائي. حتى ليؤكد بعضهم أن النظرية الكمومية تفترض عدم إمكان وجود صورة موضوعية - أو على الأقل صورة متفقة مع الحقائق الفيزيائية. أما بالنسبة لي، فإنني أرى أن لامبرر لهذا التشاؤم إطلاقاً. أو من السابق لأوانه على كل حال أن ننحاز لمثل هذا الرأي على أساس ماتمت مناقشته حتى الآن. وسوف نرى فيما بعد أن النظرية تثير عدداً من التساؤلات المحيرة، وربما بدأنا عندئذٍ نقدّر بصورة أفضل أسباب هذا القنوط. أما الآن فدعونا نكون أكثر تفاؤلاً ونحاول تفهم الصورة التي يبدو أن النظرية الكمومية تقدمها لنا.

وماهذه الصورة إلا تلك التي تقدمها ***الحالة الكمومية***. لنتخيل جسيماً كمومياً وحيداً. فمن وجهة النظر الكلاسيكية تلزم لتحديد جسيم مامعرفة موضعه في الفضاء، كما تلزم معرفة سرعته (أو اندفاعه). أما في ميكانيك الكم فكل موضع يمكن أن يحتله الجسيم هو "خيار" متاح له. وقد سبق لنا أن رأينا أن الخيارات المختلفة كلها يجب أن يُركّب بعضها مع بعض بطريقة معينة مثقّلة "بأوزان" عقدية. إن هذه المجموعة من "الأوزان" العقدية هي التي تصف حالة الجسيم الكمومية. وقد جرت العادة، في ميكانيك الكم، أن يرمز لهذه المجموعة من الأوزان بالحرف اليوناني ψ (الذي يُلفظ "بسي") والذي ينظر إليه كدالة عقدية للموضع - ويدعى ***الدالة الموجية*** (أو التابع الموجي) للجسيم. وتكون لهذه الدالة، في كل موضع x، قيمة معينة هي $\psi(x)$ ، تمثل سعة وجود الجسيم في x. وإن باستطاعتنا أن ندل على الحالة الكمومية للجسيم بالحرف ψ وحده. وسألتزم بوجهة النظر القائلة أن ***الواقع الفيزيائي*** لموضع الجسيم هو بالتحديد حالته الكمومية ψ.

كيّف ينبغي إذن أن نمثل الدالة العقدية ψ؟ إن تمثيلها في الفضاء الثلاثي الأبعاد صعب بعض الشيء، لذلك دعونا نبسّط الأمور قليلاً فنفترض أن الجسيم ملزم بالحركة على محور ثابت، وليكن المحور x من جملة الاحداثيات العادية (الديكارتية). فلو كانت ψ دالة حقيقية – ومساهي كذلك – لكنا تخيلنا محوراً y، عمودياً على المحور x، ورسمنا *الخط البياني* لتغيرات ψ (الشكل 10a-6). أما في حالتنا فنحتاج لتمثيل قيم الدالة العقدية ψ إلى "محور" عقدي. أي أن ψ لاتمثل على محور وإنما تمثل على مستوي آرغان. ويمكننا، لإجراء ذلك، أن نتخيل بعدين مكانيين آخرين هما مثلاً المحور y من الفضاء ليمثل المحور *الحقيقي* من مستوي آرغان، بينما يمثل الاتجاه z من الفضاء المحور *التخيلي*. وبذلك تمثل نقطة ما من مستوي آرغان هذا (أي نقطة ما من المستوي (y,z)) مقابلة لكل موضع على المحور(x) الدالة الموجية ψ(x) . فكلما تغيرت x تغير موضع هذه النقطة كذلك ورسمت منحنياً في الفضاء ملتفاً حول المحور x (الشكل 10b-6)، سنسميه المنحني ψ للجسيم. إن احتمال وجود الجسيم في نقطة معينة x، (وهو مايمكن الحصول عليه بوضع كواشف في مختلف نقاط المحور x) هو ببساطة مربع طويلة السعة ψ(x) أي:

$$|\psi(x)|^2$$

الذي هو في الحقيقة مربع بعد النقطة ψ(x) من المنحني ψ عن المحور x *.



الشكل 6-10: (a) الخط البياني لدالة حقيقية بدلالة متحول حقيقي x.

(b) الخط البياني لدالة عقدية ψ بدلالة متحول حقيقي x.

لكي يكون هذا النوع من التمثيل للدالة الموجية في الفضاء الفيزيائي الثلاثي الأبعاد كاملاً تلزمنا خمسة أبعاد: ثلاثة للفضاء الفيزيائي إضافة إلى بعدين آخرين لمستوي آرغان في كل نقطة نرغب برسم الدالة ψ(x) فيها. إلا أن التمثيل المبسط، على الرغم من أنه محدود ببعد واحد، مفيد على كل حال. فإذا أردنا، مثلاً، دراسة سلوك الدالة الموجية على امتداد اتجاه ما في

* تبرز هنا صعوبة ذات طابع تقني لأن الاحتمال الفعلي لوجود جسيم في نقطة محددة تماماً هو الصفر. ولذلك يجدر بنا أن نسمي $|\psi(x)|^2$ كثافة احتمالية، وهي تعني احتمال وجود الجسيم في مجال صغير محدد حول النقطة المعينة. وبهذه الصورة تعين ψ(x) كثافة سعة الاحتمال وليس سعة الاحتمال نفسها.

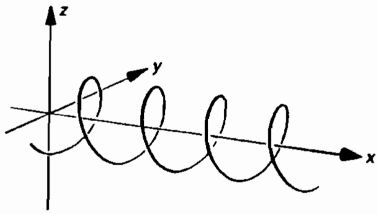
الفضاء الفيزيائي، أمكننا القيام بذلك بسهولة إذا اخترنا المحور x منطبقاً على ذلك الاتجاه ممايتيح استخدام البعدين الآخرين لتمثيل مستويات آرغان. وسوف نتأكد من فائدة هذا التدبير في تفهمنا لتجربة الشقين.

يحتاج المرء في الفيزياء الكلاسيكية، كما سبق وذكرت آنفاً، معرفة سرعة (أو اندفاع) الجسيم لكي يحدد حركته في اللحظة التالية. أما ميكانيك الكم فيبدو مقارنة بذلك، أكثر اقتصاداً. ذلك أن الدالة الموجية ψ نفسها تتضمن مختلف السعات لمختلف الاندفاعات الممكنة! (ربما خطر لبعض القراء الساخطين عدم جدوى مثل هذا الاقتصاد آخذين بعين الاعتبار كل الجهد الذي بذلناه في سبيل "تعقيد" الصورة الكلاسيكية البسيطة التي بحوزتنا لجسيم نقطي. وبالرغم من أنني أشعر بالكثير من التعاطف نحو هؤلاء القراء إلا أنني أجد أن من واجبي أن أنبههم: فالقادم أسوأ!). ولكن من أين للدالة ψ أن تعين سعات الاحتمال المتعلقة بالسرعة؟ في الواقع يفضل أن نفكر في سعات الاندفاع (نذكر أن الاندفاع هو جداء سرعة الجسيم في كتلته؛ أنظر ص209). إن مايجب القيام به هو تطبيق مايسمى ***بالتحليل التوافقي*** harmonic analysis على الدالة ψ. وسيكون من غير المناسب أن أقوم بشرح التحليل التوافقي بالتفصيل هنا، إلا أن مايمكن قوله هو أنه وثيق الصلة بتحليل الأصوات الموسيقية. فالموجة الصوتية، كائناً ماكان شكلها، يمكن دوماً تحليلها إلى مجموع توافقيات (أو مدروجات) مختلفة (ومن هنا أتت التسمية "التحليل التوافقي") هي النغمات الصافية لطبقات الصوت المختلفة (أي التواترات الصافية المختلفة). أما في حالة دالة موجية ψ فتقابل "النغماتُ الصافية" قيم الاندفاع المختلفة الممكنة التي يمكن أن تكون للجسيم. وتكون السعة المقابلة لكل قيمة من قيم الاندفاع مرتبطة بمقدار مساهمة كل "نغمة صافية" في الدالة ψ. وهذه "النغمات الصافية" تدعى ***حالات الاندفاع***.

ماهو، ياترى، شكل المنحني ψ الذي يمثل حالة الاندفاع؟ إنه يشبه فتّاحة الزجاجات، وهو مايعرف في الرياضيات باسم لولب (helix) (الشكل 6-11)* . وتقابل اللوالبُ ذات الخطوات الصغيرة (أي الملفوفة بصورة متراصة) قيمَ الاندفاع الكبيرة، أما تلك التي لاتكاد تكون ملفوفة إلا قليلاً فتقابل الاندفاعات الصغيرة جداً. أما في الحالة التي لايكون فيها المنحني ψ ملتفاً على الإطلاق، بل يكون على شكل خط مستقيم، فتكون قيمة الاندفاع مساوية الصفر. إن ***علاقة بلانك*** الشهيرة متضمنة في هذا، فاللف المتراص يعني طول موجة صغير وهذا يقابله تواتر عال، أي قيم كبيرة لكل من الطاقة والاندفاع. أما اللف القليل فيعني تواتراً منخفضاً وطاقة صغيرة

* إذ أردنا استخدام لغة رياضية أكثر دقة، أمكن التعبير عن المنحنيات اللولبية هذه، التي تصف حالات الاندفاع، بعلاقة من النوع $\psi = e^{\frac{ipx}{\hbar}} = \cos(ipx/\hbar) + i\sin(ipx/\hbar)$ (انظر الفصل الثالث ص122) حيث p هي قيمة الاندفاع المعينة.

ذلك أن الطاقة E تتناسب دوماً مع التواتر ν، (E = hν). وإذا وُجهت مستويات آرغان بالطريقة المعتادة (أي بحيث تكون جملة المحاور x و y و z يمينية «وفق قاعدة اليد اليمنى») تم تمثيل الاندفاعات التي جهتها في الاتجاه الموجب للمحور x ***بلوالب يمينية*** (وهي النوع العادي من اللوالب فاتحة الزجاجات).



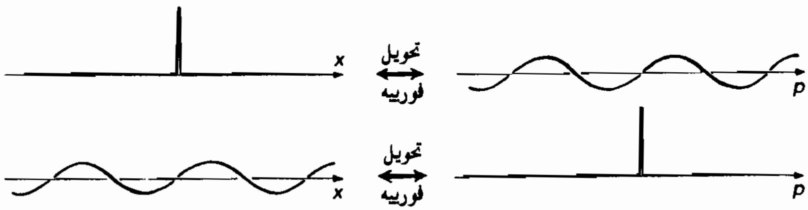
الشكل 6-11: المنحني ψ اللولبي الممثل لحالة الاندفاع.

إن من المناسب في بعض الأحيان ألا نصف الحالات الكمومية بوساطة الدالات الموجية العادية، كما فعلنا سابقاً، وإنما بوساطة دالات موجية اندفاعية (أي بدلالة الاندفاع). ويعني هذا طريقة في التمثيل نحلل فيها ψ إلى دالات حالات الاندفاع المختلفة ومن ثم بناء دالة جديدة $\tilde{\psi}$ تكون في هذه الحالة تابعاً للاندفاع p بدلاً من أن تكون تابعاً للموضع x. وتكون القيمة $\tilde{\psi}$ (p) التي تأخذها هذه الدالة من أجل كل قيمة p متناسبة مع مساهمة حالة الاندفاع p هذه في تشكيل الحالة ψ. (يدعى فضاء قيم p فضاء الاندفاعات). وتفهم الدالة $\tilde{\psi}$ عندئذٍ كما يلي: من أجل كل قيمة p يمثل العدد العقدي $\tilde{\psi}$ (p) ***سعة أن يكون للجسيم اندفاعاً يساوي p.***

إلا أن هناك تسمية رياضية للعلاقة التي تربط بين الدوال ψ و $\tilde{\psi}$، إذ تدعى الدوال ψ ***تحويلات فورييه*** للدوال $\tilde{\psi}$، والعكس بالعكس، وذلك نسبة إلى المهندس الرياضي الفرنسي جوزيف فورييه Joseph Fourier (1768-1830). وسأكتفي هنا بإعطاء بعض الملاحظات البسيطة حول هذه التحويلات. فهناك أولاً تناظر ملحوظ بين ψ و $\tilde{\psi}$. وبالفعل إذا أردنا العودة إلى ψ ابتداءً من $\tilde{\psi}$ وجب أن نطبق الإجراء ذاته الذي انتقلنا به من ψ إلى $\tilde{\psi}$، أي وجب أن تخضع $\tilde{\psi}$ الآن للتحليل التوافقي. وتسمى عندئذٍ "النغمات الصافية" (أي اللوالب في التمثيل في فضاء الاندفاعات) ***بحالات الموضع***. فيحدد كل موضع x "نغمة صافية" في فضاء الاندفاعات، أما مقدار مساهمة هذه "النغمة الصافية" في $\tilde{\psi}$ فتحدده القيمة التي تأخذها الدالة ψ في الموضع x، أي ψ (x).

وإذا عدنا إلى فضاء المواضع العادي وجدنا أن حالة الموضع تمثل بدالة ψ ذات قمة حادة جداً عند الموضع x المعين لأن كل السعات معدومة عدا تلك عند قيمة x نفسها. ويطلق على مثل هذه الدالة اسم ***الدالة دلتا*** (أو دالة ديراك) بالرغم من أنها، لو شئنا الدقة، ليست دالة تماماً بالمعنى المألوف لأن قيمتها عند x لانهائية. وبصورة مماثلة فإن حالات الاندفاع (الممثلة بلوالب

في التمثيل في فضاء المواضع) تقابل دوال دلتا في التمثيل في فضاء الاندفاعات (انظر الشكل 12-6). وهكذا نرى أن تحويل فورييه للولب هو دالة دلتا، والعكس بالعكس.



الشكل 12-6: تتحول الدوال دلتا في فضاء المواضع إلى لوالب في فضاء الاندفاعات، والعكس بالعكس.

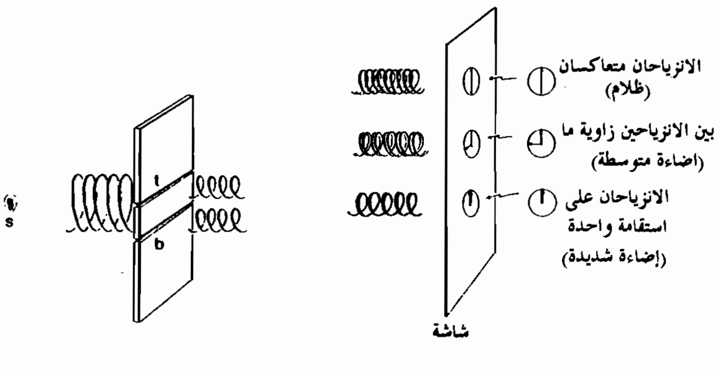
إن وصف الحالات في فضاء المواضع مفيد عندما يريد المرء إجراء قياس لموضع الجسيم، أي عندما تُضخَّم آثار مواضع الجسيم المختلفة حتى تبلغ المستوى الكلاسيكي. (ويمكن القول، على نحو تقريبي، أن الخلايا الضوئية وألواح التصوير، تحقق قياس مواضع الفوتونات). أما الوصف في فضاء الاندفاعات فيكون مفيداً عندما يريد المرء قياس اندفاع الجسيم، أي تضخيم آثار الاندفاعات المختلفة الممكنة إلى المستوى الكلاسيكي. (يمكن استخدام آثار الارتداد أو الانعراج (الحيود) بوساطة بلورة لقياس الاندفاع). وفي كلتا الحالتين يعطينا مربع طويلة الدالة الموجية المقابلة (ψ أو ψ̃) احتمال نتيجة القياس المجرى.

سننهي هذه الفقرة بالعودة، مرة أخرى، إلى تجربة الشقين. لقد رأينا أنه، طبقاً لميكانيك الكم، يجب أن يسلك حتى الجسيم الوحيد، سلوك الموجة، وذلك بالرغم من كونه وحيداً مفرداً. وأن هذه الموجة توصف بدالة موجية ψ. وأكثر الأمواج "شبهاً بالأمواج" هي تلك التي تصف حالات الاندفاع. ففي تجربة الشقين كنا ننظر إلى فوتونات ذات تواتر محدد، فكانت دالة الفوتون الموجية إذن مؤلفة من حالات اندفاع ذات اتجاهات مختلفة، إنما ذات خطوة لولب واحدة، وماخطوة اللولب هذه سوى ***طول الموجة***. (إن مايحدد طول الموجة هو التواتر)† .

تنتشر كل دالة موجية للفوتون ابتداءً من المنبع s وتمر من كلا الشقين معاً (بفرض عدم إجراء أي كشف أو قياس عند الشقين) قبل أن تتابع طريقها وتصل إلى الشاشة. لكنه لايمر إلا جزء صغير من هذه الدالة الموجية من الشقين، وباستطاعتنا إذن النظر إلى كل من الشقين كما لو كان منبعاً جديداً تنتشر منه الدالة الموجية في الفضاء بصورة مستقلة. يتداخل جزءا الدالة الموجية هذان أحدهما مع الآخر بصورة يضاف فيها أحدهما للآخر، حين يبلغان الشاشة، في مواضع معينة، بينما يلغي، في مواضع أخرى أحدهما الآخر. ولكي نحدد المواضع التي تضاف

† هذا صحيح طالما أن انتشار الموجة يتم في الوسط ذاته.

فيها الأمواج بعضها لبعض، أو التي تلغي فيها بعضها بعضاً، نأخذ نقطة p على الشاشة ونرسم الخطين المستقيمين اللذين يصلان بين p والشقين t و b. لدينا لولب على طول الخط tp ولولب آخر على طول الخط bp. (لدينا كذلك لولب على طول كل من الخطين st و sb، ولكننا إذا افترضنا أن المنبع متساوي البعد عن كل من الشقين يكون كل لولب قد دار، عند بلوغه الشق المقدار ذاته الذي دار به اللولب الآخر). إن الزاوية التي يكون قد دار بها كل من اللولبين (على طول tp و bp) قبل بلوغ الشاشة تتوقف على طول كل من القطعتين المستقيمتين tp و bp. فحين يكون الفرق بين هذين الطولين مساوياً عدداً صحيحاً من الأطوال الموجية يكون كل من اللولبين قد دار حول محوره، عند p، بالزاوية نفسها (بحيث أن الزاوية θ المذكورة في الفقرة السابقة تساوي الصفر). وهكذا تضاف السعتان المقابلتان، إحداهما إلى الأخرى، ونحصل على إضاءة شديدة في p. أما حين يكون الفرق بين هذين الطولين مساوياً عدداً صحيحاً ونصف طول موجي يكون كل من اللولبين قد دار، عند p، بزاوية تختلف عن الزاوية التي دار بها الآخر بمقدار 180°، (θ = 180°) وتلغي عندئذٍ السعتان إحداهما الأخرى وتكون p نقطة مظلمة. أما في الحالات الأخرى كلها فيكون للفرق بين زاويتي دوران اللولبين، لدى بلوغهما النقطة p، قيمة ما، وتضاف السعتان إحداهما إلى الأخرى بصورة جزئية، وتكون شدة الإضاءة في p متوسطة بين الإضاءة الشديدة والظلام. (أنظر الشكل 6-13).



الشكل 6-13: تحليل تجربة الشقين بطريقة وصف حالات الاندفاع للفوتون بوساطة اللوالب.

مبدأ الارتياب (أو عدم التعيين)

لاشك أن معظم القراء قد سمعوا ***بمبدأ هايزنبرغ*** في الارتياب، الذي ينص على أنه لايمكن أن يقاس بدقة (أي أن يُضخَّم إلى المستوى الكلاسيكي) موضع جسيم ما واندفاعه معاً في آن

واحد. وأكثر من هذا، فإن جداء دقتي قياس الموضع Δx والاندفاع Δp ***محدود بصورة مطلقة*** ويعين بالعلاقة:

$$\Delta x . \Delta p \geq \hbar$$

وتشير هذه العلاقة إلى أنه بقدر مايكون قياس x دقيقاً يكون قياس p أقل دقة، والعكس بالعكس. فلو أمكن قياس موضع الجسيم بدقة ***لانهائية*** لأصبح اندفاعه غير معين على الإطلاق، وبالعكس لو قيس الاندفاع بدقة تامة لأصبح الموضع غير معروف إطلاقاً. ولتكوين فكرة عن مقدار الحد الذي تفرضه علاقة هايزنبرغ، لنفترض أن موضع إلكترون ما قيس بدقة نانومتر واحد (10^{-9} متر)، فيصبح اندفاعه غير معين لدرجة أنه بعد انقضاء ثانية واحدة لايمكن توقع وجوده في دائرة نصف قطرها أقل من 100 كيلو متر!†

تقود بعض تفسيرات النظرية الكمومية إلى الاعتقاد بأن الأمر يتعلق بنوع من عدم الإتقان المرتبط بعملية القياس ذاتها. وطبقاً لهذا فإن محاولة تعيين موضع الإلكترون، في المثال السابق، ستؤدي لامحالة إلى إعطائه "رفسة" عشوائية ذات شدة يحتمل أن تجعله يندفع بسرعة كبيرة هي التي يدل عليها مبدأ هايزنبرغ. وتذهب تفسيرات أخرى إلى أن الارتياب هو خاصة من خواص الجسيم نفسه وأن طبيعة حركته ذاتها عشوائية، مما يؤدي إلى أنه لايمكن التنبؤ بسلوكه في المستوى الكمومي. ويؤكد آخرون أن الجسيم الكمومي نفسه شيء غير قابل للفهم ولايمكن تطبيق المفاهيم الكلاسيكية، كمفهومَيْ الموضع والاندفاع، عليه. وأنا شخصياً غير راضٍ عن أي من هذه التفسيرات الثلاثة، فالأول مضلل بعض الشيء، بينما الثاني خطأ بالتأكيد، والثالث متشائم دون مبرر.

بماذا يفيدنا – في الواقع – الوصف بوساطة الدالة الموجية ياترى؟ دعونا بادئ ذي بدء نعود إلى وصف حالة الاندفاع، حيث يكون الاندفاع هنا معيناً بصورة دقيقة، ويكون المنحني ψ على شكل لولب يبقى بعده عن محوره ثابتاً دوماً. ولذلك تكون لمربعات طويلات السعات المقابلة لمختلف المواضع قيماً متساوية فيما بينها. ونتيجة لذلك يكون احتمال وجود الجسيم، لدى إجراء قياس موضعه، في نقطة ما هو نفسه في كل نقاط الفضاء. وهذا يعني أن موضع الجسيم، والحالة هذه، غير معين إطلاقاً! فماذا لو نظرنا في حالة الموضع بدلاً من حالة الاندفاع؟ يكون المنحني ψ الآن هو دالة دلتا، فموضع الجسيم محدد تماماً – في المكان المقابل لذروة الدالة دلتا – والسعات المقابلة للمواضع الأخرى تكون كلها معدومة. أما سعات الاندفاع فيتم الحصول عليها بسهولة إذا استخدمنا فضاء الاندفاعات حيث يكون المنحني $\tilde{\psi}$ الآن على شكل

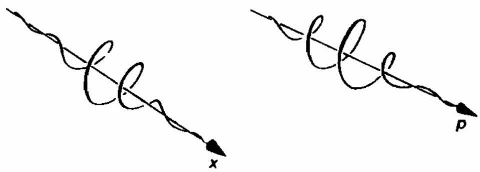
---

† هذا ناتج من كون الارتياب في سرعة الإلكترون، محسوباً من علاقة هايزنبرغ، في هذه الحالة، من رتبة 100 كيلو متر في الثانية.

لولب، وتكون إذن لمربعات طويلات سعات اندفاع الجسيم كلها القيمة ذاتها. وتكون نتيجة قياس اندفاع الجسيم غير معينة إطلاقاً!

قد يكون من المفيد أن ننظر في حالة متوسطة تكون فيها المواضع والاندفاعات كلها محددة جزئياً فقط بما يتفق مع علاقة هايزنبرغ. يمثل الشكل 6-14 المنحني ψ وكذلك المنحني ψ المقابل (اللذين كل منهما هو تحويل فورييه للآخر). في مثل هذه الحالة، نلاحظ أن بعد كل من المنحنيين عن محوره غير مهمل في منطقة صغيرة جداً فقط، وفيما عدا ذلك يبقيان قريبين جداً من المحور. وهذا يعني أنه ليست لمربعات الطويلة قيمة مختلفة بشكل ملحوظ عن الصفر إلا في منطقة محدودة جداً، وذلك في كلا الفضاءين: فضاء المواضع وفضاء الاندفاعات. فموضع الجسيم محدد إذن نوعاً ما في المكان، إنما مع شيء من الانتشار، وبصورة مماثلة فإن اندفاعه محدد أيضاً بصورة جيدة نسبياً.

وهكذا فإن الجسيم يتحرك بسرعة محددة تحديداً جيداً، أما انتشاره في الموضع فلا يزداد مع مرور الزمن. وتدعى مثل هذه الحالة الكمومية ***بالحزمة الموجية*** وكثيراً ماتؤخذ على أنها أفضل تقريب كمومي لجسيم كلاسيكي. لكن يجب أن نعير انتباهنا إلى أن الانتشار في قيمة الاندفاع (أي في قيمة السرعة أيضاً) يقتضي أن تتوسع الحزمة الموجية مع مرور الزمن. وكلما كانت الحزمة في البدء أكثر تموضعاً في الفضاء (أي كلما كان موضع الجسيم أكثر تحديداً) كان توسعها أسرع.



الشكل 6-14: الحزم الموجية المتموضعة في كل من فضاء المواضع وفضاء الاندفاعات.

إجراءا التطور U و R

إن في وصفنا السابق لتطور الحزمة الموجية مع مرور الزمن عرضاً ضمنياً لمعادلة شرودنغر التي تصف كيفية تطور الدالة الموجية مع الزمن. إذ إن ماتدل عليه معادلة شرودنغر في واقع الأمر هو أننا إذا حللنا ψ إلى حالات اندفاع (إلى "نغمات صافية") تحركت كل من هذه المركبات مبتعدة بسرعة مساوية إلى c^2† مقسومة على سرعة جسيم كلاسيكي له الاندفاع

---

† c سرعة الضوء.

الذي نحن بصدده. والحقيقة أن الكتابة الرياضية لمعادلة شرودنغر تتيح قول الشيء ذاته بصورة أكثر إيجازاً، وسوف نرى شكلها الدقيق فيما بعد. فهي تشبه إلى حد ما معادلات هاملتون أو مكسويل (وهي إضافة لذلك ذات علاقة وثيقة بها)، وهي، مثل تلك المعادلات تقدم وصفاً ***حتمياً تماماً*** لتطور الدالة الموجية مع الزمن وذلك بمجرد أن تعرف هذه الدالة في لحظة ما (أنظر ص 342).

بالفعل إذا نظرنا إلى ψ على أنها تصف "واقع" العالم، لم نجد شيئاً من هذه "اللاحتمية" التي يقال أنها صفة ملازمة للنظرية الكمومية، على الأقل طالما كانت ψ خاضعة للتطور الحتمي الشرودنغري الذي سندعوه التطور U. ولكننا في كل مرة "نجري فيها قياساً"، ونضخم فيها إذن بعض الآثار الكمومية إلى المستوى الكلاسيكي، تتغير القواعد، إذ لانعود إلى استخدام الاجراء U وإنما إلى إجراء مختلف كلياً سوف أدعوه R، لنشكل بموجبه مربعات السعات الكمومية بهدف الحصول على الاحتمالات الكلاسيكية(4). وهذا الإجراء R، - وفقط هذا الإجراء - هو الذي يدخل الارتيابات والاحتمالات في النظرية الكمومية.

ولكن الإجراء الحتمي U هو مايبدو أنه جزء النظرية الكمومية الذي يهم الفيزيائيين بصورة أساسية. بينما نجد أن مايثير فضول الفلاسفة هو الإجراء اللاحتمي R لاختزال متجهة الحالة (أو كما يوصف أحياناً: انهيار الدالة الموجية). وسواء نظرنا إلى R على أنه مجرد تغير في "المعرفة المتاحة" عن المنظومة المدروسة، أم نظرنا إليه (كما أفعل أنا) كشيء يمثل "الأمر الواقع"، فإن الطريقة التي يوصف بها تطور متجهة الحالة لمنظومة فيزيائية مع الزمن تختلف كل الاختلاف من وجهة النظر الرياضية. وبالفعل فإن الإجراء U حتمي تماماً، بينما R احتمالي، ولذلك يحافظ U على مبدأ الانضمام العقدي للسعات الكمومية، بينما يخرقه R تماماً. ويؤثر U بصورة مستمرة بينما R متقطع بصورة واضحة. ومن غير الممكن، تبعاً للمفاهيم العادية لميكانيك الكم "استخراج" R من U ولو بطريقة معقدة. إن الإجراءين U و R هما، ببساطة، إجراءان مختلفان، يمثل كل منهما "نصف" تفسير الشكلية الكمومية. ولكن "لاحتمية" النظرية كلها تأتي من R وليس من U. وإذا أردنا أن نفهم من أين يأتي الاتفاق الرائع بين النظرية الكمومية والحقائق التجريبية فلابدَّ من أخذ U و R كليهما بالحسبان.

لنعد الآن إلى الدالة الموجية ψ، ولنفرض أنها حالة اندفاع. ستستمر هذه الحالة نفسها طالما أن الجسيم لايتفاعل مع أي شيء آخر (وهذا ماتشير إليه معادلة شرودنغر)، ومهما تكن اللحظة التي نقرر فيها "قياس الاندفاع" فإن النتيجة تكون ذاتها دوماً. فلاوجود للاحتمالات هنا. والتنبؤ بنتيجة القياس هنا مؤكد تماماً كما في النظرية الكلاسيكية. ولكن لنفرض أننا، في لحظة معينة، قررنا قياس موضع الجسيم (أي تضخيمه إلى المستوى الكلاسيكي). سنجد عندئذٍ أن أمامنا مجموعة كبيرة من السعات الاحتمالية التي علينا أن نربّع طويلاتها؛ فنحصل عندئذٍ على

مجموعة من الاحتمالات، ويكون عدم التعيين المتعلق بالنتيجة التي سيؤول إليها ذلك القياس كاملاً - وكل هذا بالاتفاق مع مبدأ هايزنبرغ.

لنفرض من جهة أخرى، أن الدالة ψ هي، في البداية، حالة موضع (أو هي تقريباً كذلك). تدلنا معادلة شرودنغر أن ψ لن تبقى حالة موضع وإنما سوف تتبدد بسرعة. هذا صحيح، لكن الطريقة التي تتبدد بها ψ محددة تماماً بوساطة معادلة شرودنغر. وليس في هذا السلوك ماهو لاحتمي أو احتمالي. وتوجد، من حيث المبدأ، تجارب نستطيع بها التأكد من أن الأمر كذلك (وسيأتي الحديث عنها فيما بعد). أما إذا تهورنا واخترنا قياس الاندفاع، فإننا نجد عندئذٍ سعات مختلفة لكل قيم الاندفاع الممكنة، لكنها كلها ذات طويلات متساوية بحيث أن عدم التعيين في نتيجة القياس كامل - وهذا مايتفق أيضاً مع مبدأ هايزنبرغ.

لنتصور الآن أن ψ تمثل حزمة موجية، إن تطورها اللاحق تحدده تماماً، بصورة مماثلة، معادلة شرودنغر، وهناك تجارب تسمح، من حيث المبدأ، بتتبع هذا الأمر. ولكن ماإن نقرر إجراء قياس، من نوع مختلف، على الجسيم المدروس - كأن نجري قياس موضعه أو اندفاعه - حتى تظهر الارتيابات، ومرة أخرى بالاتفاق مع مبدأ هايزنبرغ، التي تقابلها احتمالات تحسب من مربعات طويلات السعات.

كل هذا، دون شك، غريب وغامض. لكنه لايشكل صورة للعالم مبهمة لايمكن فهمها. فهناك جزء كبير مما يشكل هذه الصورة تحكمه قوانين واضحة ودقيقة. والشيء الوحيد غير المحدد بوضوح هو متى ينبغي أن توضع القاعدة الاحتمالية R موضع التنفيذ بدلاً من القاعدة الحتمية U. ماذا يعني "إجراء قياس"؟ لماذا (ومتى) تصبح مربعات طويلات السعات "احتمالات"؟ هل يمكن فهم "المستوى الكلاسيكي" كمومياً؟ هذه أسئلة عميقة ومحيّرة وسنحاول الإجابة عنها لاحقاً في هذا الفصل.

وجود الجسيمات في مكانين في آن واحد؟

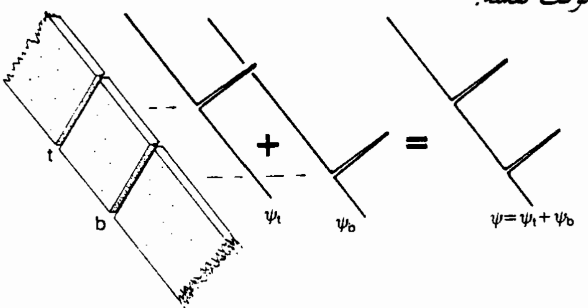
لقد تبنيت فيما سبق بالنسبة للدالة الموجية وجهة نظر أكثر "واقعية" مما هو معتاد لدى الفيزيائيين. ذلك أنني التزمت بوجهة النظر القائلة أن الحالة "الحقيقية موضوعياً" لجسيم مفرد توصف بالفعل بوساطة دالته الموجية ψ. ويبدو أن هذا موقف يجد الكثيرون صعوبة في القبول به. ولعلّ أحد أسباب ذلك هو أن هذا الموقف يتضمن اعتبار الجسيمات المفردة ممتدة مكانياً وليست مركّزة في نقاط معينة. ويكون هذا الامتداد في حده الأعظمي بالنسبة لحالة الاندفاع لأن ψ تكون عندئذٍ موزعة بالتساوي في الفضاء كله. ويفضل بعضهم أن يتخيلوا أن موضع الجسيم غير معين إطلاقاً، بدلاً من أن يتخيلوا أن الجسيم نفسه ممتد في الفضاء، بحيث أن كل مايمكن قوله عن موضع الجسيم هو أن احتمال وجوده متساو في أي مكان كان. ولكننا رأينا أن ماتزودنا به الدالة الموجية هو توزع السعات في مختلف المواضع وليس توزع الاحتمالات.

فلو أننا عرفنا توزع السعات هـذا (أي الدالـة ψ)، لعرفنـا – مـن معادلـة شـرودنغر – الطريقـة الدقيقة التي تتطور بها حالة الجسيم من لحظة لأخرى. فلكي تكون حركة الجسيم محددة لابد من تمثيل الجسيم على أنه "ممتد"، وبالفعل إذا تبنينا وجهة النظر هذه وجدنـا أن حركـة الجسيم محددة تماماً. أما وجهة النظر "الاحتمالية" بالنسبة إلى ψ (x) فليست مجدية إلاّ إذا أجرينـا قياسـاً لموضع الجسيم، وفي هذه الحالة لاتدخل ψ (x) إلاّ على شكل مربع طويلتها: $|\psi(x)|^2$.

يبدو أنه لابد لنا من التوصل إلى فهم معين لهذا التصور الذي يمكن أن يكون الجسيم بحسبه ممتداً على مناطق واسعة في الفضاء، وأن يبقى ممتداً حتى يتم إجراء قياس موضعه. وحتـى حين يكون الجسيم، في لحظة ما، متموضعاً وممثلاً بحالة موضـع فإنـه سـرعان مايبدأ بـالامتداد، منـذ اللحظة التالية مباشرة. فإذا كان من الصعب القبـول بفكـرة أن حالـة الاندفـاع يمكـن أن تمثـل "الواقع"، فإن من الأصعب التفكير بأن الحالـة ***ذات الذروتـين*** الـتي تحـدث مباشـرة بعـد مـرور الجسيم عبر شقين، هي حالـة "واقعيـة" (الشـكل 6-15). ففـي الاتجـاه الشـاقولي يكـون للدالـة الموجية ذروتان حادتان، واحدة عند كل من الشـقين، إذ تكـون ψ في الحقيقـة مجمـوع* دالتـين موجيتين ψ_t و ψ_b متمركزتين عند الشقين العلوي والسفلي على الترتيب:

$$\psi(x) = \psi_t(x) + \psi_b(x)$$

فإذا نظرنـا إلى ψ علـى أنهـا تمثـل "واقـع" حالـة الجسيم، وجـب علينـا أن نقبـل بـأن الجسيم "موجود" بالفعل في ***مكانين*** في آن واحد. وحسب هذه الرؤية يكون الجسيم قد ***مرّ بالفعل عبر الشقين في الوقت نفسه***.



الشكل 6-15: بمجرد نفوذ دالة الفوتون الموجية من الشقين تكون لها ذروتان في آن واحد.

من المناسب هنا أن نتذكر الاعتراض حول وجهة النظر القائلة أن الجسيم "يمر عـبر الشـقين في آن واحد": إذا أجرينا قياسـاً عند الشـقين بهدف تحديد عبر أي الشـقين مـر الجسـيم فإننـا

---

* جرت العادة في ميكانيـك الكـم أن يضـرب هـذا المجمـوع بمعامـل قـدره $1/\sqrt{2}$، فنحصـل عندئـذٍ على $(\psi_t + \psi_b)/\sqrt{2}$، لكن لالزوم لإدخال هذا التعقيد هنا.

نجد دوماً الجسيم ***بكامله*** عند هذا الشق أو عند ذاك. لكن هذا نـاتج مـن كوننـا نجـري ***قياساً لموضـع*** الجسـيم، والدالـة ψ لاتزودنـا في هـذه الحالـة إلا بـالتوزع الاحتمـالي $|\psi(x)|^2$ لموضـع الجسيم- وذلك وفق إجراء مربع طويلة الدالة الموجية، ولذلك نجد بالفعل أن الجسيم عنـد هـذا الشق أو عند الشق الآخر. لكـن هنـاك أنماطـاً أخـرى مـن القيـاس، غـير قيـاس الموضـع، يمكـن إجراؤها، ونحتاج لذلك لمعرفة الدالة الموجية ذات الذروتين نفسها، وليس بمجرد مربع الطويلـة في مواضع x مختلفة. ويمكن أن يميز مثل هذا القياس، مثـلاً، بـين الحالـة ذات الذروتـين مـن النـوع المذكور سابقاً:

$$\psi = \psi_t + \psi_b$$

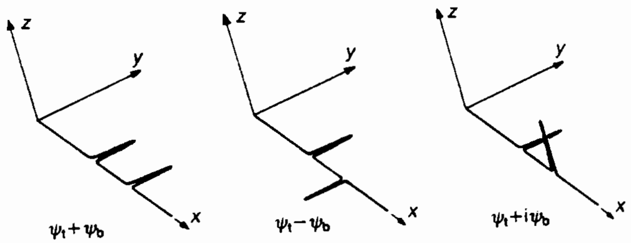
وبين حالات أخرى ذات ذروتين كذلك، إنما من الشكل:

$$\psi_t - \psi_b$$

أو

$$\psi_t + i\psi_b$$

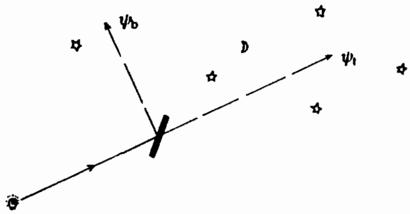
(أنظر الشكل 16-6 الذي مثلت فيه منحنيات ψ في كل من هذه الحالات الثلاث المختلفـة) وبما أنه توجد بالفعل قياسات تميز بين هذه الإمكانات المختلفة، فينبغـي أن تقـابل كلهـا أنماطـاً مختلفة لوجود الفوتون.



الشكل 16-6: ثلاث طرق مختلفة تكون فيها دالة الفوتون الموجية ذات ذروتين.

ليس من الضروري أن يكون الشقان قريبـين أحدهمـا مـن الآخـر لكـي يمـر الفوتـون "مـن كليهما في آن واحد". والتجربة التالية تبين أنه يمكن للجسيم الكمومي أن يوجد "في مكانين في آن واحد" مهما كان هذان المكانان متباعدين. لننظر في تجربة مختلفة قليـلاً عـن تجربـة الشـقين، يكون فيها، كما في السابق، مصباح يصدر ضوءاً وحيد اللون فوتوناً إثر فوتون، ولكـن عوضـاً عن إمرار الضوء عبر شقين سندعه ينعكس على مرآة نصف شفافة مائلة بزاوية 45° على حزمة الضوء (المرآة نصف الشفافة تعكس نصف الضوء الذي يسقط عليها وتدع النصف الباقي ينفذ منها). تنشطر دالة الفوتون الموجية، بعد اصطدامها بالمرآة، إلى شطرين أحدهما ينعكس والآخر

يتابع سيره في الاتجاه ذاته الذي ورد به الفوتون. وتكون الدالة الموجية هنا أيضاً ذات ذروتين، كما في حالة الفوتون النافذ من الشقين، إنما تكون الذروتان الآن أكثر تباعداً بكثير، لأن إحدى الذروتين تمثل الفوتون المنعكس بينما تمثل الذروة الأخرى الفوتون النافذ (أنظر الشكل 6-17). وفوق ذلك يزداد البعد بين الذروتين مع مرور الزمن ويستمر في الازدياد دون حدود. لنتخيل أن جزئي الدالة الموجية ينتشران في الفضاء وأنه مضى على ذلك عام كامل، سيكون البعد عندئذٍ بين ذروتي دالة الفوتون الموجية سنة ضوئية. وبتعبير آخر سيكون الفوتون في آن واحد في مكانين يبعد أحدهما عن الآخر سنة ضوئية!

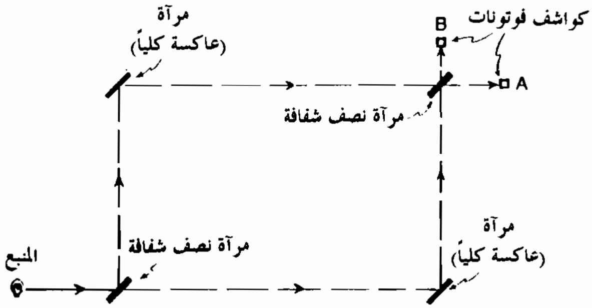


الشكل 6-17: يمكن لذروتي الدالة الموجية ذات الذروتين أن تكونا بعيدتين إحداهما عن الأخرى سنوات ضوئية، ويكفي لتحقيق ذلك استخدام مرآة نصف شفافة.

هل هناك سبب يدعونا لأن نأخذ مثل هذا التصور الغريب مأخذ الجد؟ ألا نستطيع أن نقول ببساطة أن هناك احتمال 50 في المئة لأن يكون الفوتون في أحد المكانين واحتمال 50 في المئة لأن يكون في المكان الآخر؟ لا، فهذا غير ممكن! فبغض النظر عن طول المسافة التي يكون قد قطعها الفوتون، فمن الممكن دوماً جعل جزأي الحزمة ينعكسان ويعودان إلى الالتقاء مما يؤدي إلى ظهور آثار تداخل لا يمكن تفسيرها إذا افترضنا أن الفوتون موجود في إحدى الحزمتين باحتمال معين، وأنه موجود في الحزمة الأخرى باحتمال مكمل للأول. لذلك لنفترض أن كلاً من شطري الحزمة يصطدم بمرآة عاكسة تماماً ومائلة بزاوية مناسبة بحيث تلتقي الحزمتان المنعكستان في نقطة ما توضع فيها مرآة أخرى نصف شفافة موازية للأولى. وتوضع بعد ذلك خليتان ضوئيتان على امتداد الحزمتين، كما هو موضح في الشكل 6-18، تعملان عمل كاشفين. فماذا نجد؟ فلو كان احتمال أن يتبع الفوتون أحد المسارين هو 50 في المئة، واحتمال أن يتبع المسار الآخر هو 50 في المئة لكنا وجدنا أن احتمال أن يسجل أحد الكاشفين وصول الفوتون إليه هو 50 في المئة وأن احتمال أن يسجله الكاشف الآخر هو أيضاً 50 في المئة. إلاّ أن الأمور لاتجري على هذه الصورة. فلو كان للمسارين الممكنين الطول نفسه تماماً لوجدنا أن احتمال وصول الفوتون إلى الكاشف A (الموضوع في الاتجاه الذي كان للفوتون في البداية) هو 100%، وأن احتمال وصوله إلى الكاشف B هو صفر في المئة. فالفوتون ***متأكد*** من

وصوله إلى الكاشف A! (يمكن أن نقتنع بصحة ماسبق باستخدام التمثيل بوساطة اللولب، المذكور سابقاً ، مثلما فعلنا في تجربة الشقين).

إن هذه التجربة ومثيلاتها لم تجر، بطبيعة الحال، بأطوال من مرتبة السنة الضوئية، لكن هذا لايجعل أحداً (من الفيزيائيين الكموميين) يشك بصحة نتيجة مثل هذه التجربة فيما لو أجريت، لأنه تم بالفعل إجراء تجارب من هذا النوع بأطوال عدة أمتار وكانت نتائجها على اتفاق تام مع تنبؤات ميكانيك الكم (راجع Wheeler 1983). فماذا يمكننا أن نستنتج من هذا كله حول واقع نمط وجود الفوتون فيما بين التقائه الأول والثاني بمرآة نصف شفافة؟ يبدو أنه لامفر من الافتراض بأن الفوتون ***قد اتبع***، بشكل أو بآخر، كلا المسارين في آن واحد. لأنه لو وضع حاجز يمتص الضوء معترضاً أحد المسارين لأصبح احتمال وصول الفوتون إلى A واحتمال وصوله إلى B متساويين. أما حين يكون كلا المسارين مفتوحين (ويكون طولاهما متساويين) فلا يبقى أمام الفوتون سوى إمكان واحد: الوصول إلى A. أي أن إغلاق أحد المسارين يجعل وصول الفوتون إلى B ممكناً! وحين يكون المساران مفتوحين "يعرف" الفوتون بطريقة ما أنه لايمكنه الوصول إلى B، أي أنه لابد أن يكون قد "استشم" كلا المسارين.



الشكل 6-18: لاتمثل ذروتا الدالة الموجية ذات الذروتين احتمالي وجود الفوتون على هذا الفرع أو ذاك من فرعي الجهاز. يمكن جعل المسارين اللذين يسلكهما الفوتون يتداخلان.

إن وجهة نظر نيلس بور، القائلة أنه لايمكن إعطاء "معنى" موضوعي لوجود الفوتون بين لحظتين أجري فيهما قياس، تبدو لي أنها رؤية متشائمة أكثر من اللازم فيما يتعلق بحقيقة حالة الفوتون. فلوصف "حقيقة" موضع الفوتون يقدم لنا ميكانيك الكم ***دالة موجية***، كل مافي الأمر أنها تكون، فيما بين المرآتين نصف الشفافتين، ذات ذروتين يمكن أن تكون المسافة بينهما، في أحوال معينة، كبيرة جداً.

ينبغي أن نلاحظ كذلك أن العبارة القائلة "إن الفوتون في مكانين معينين في آن واحد" ليست وصفاً كاملاً لحالته: إذ يجب أن نتمكن من تمييز الحالة $\psi_t + \psi_b$ من الحالة $\psi_t - \psi_b$ (أو من $\psi_t + i\psi_b$ مثلاً) حيث تتعلق ψ_t و ψ_b هنا بموضعي الفوتون في كل من المسارين (مسار

النفوذ ومسار الانعكاس على الترتيب). وهذا التمييز أساسي لأنه هو الـذي يحـدد هـل سـيصل الفوتون بالتأكيد إلى A، أو بالتأكيد إلى B (أم سيصل إلى A و B باحتمالين قيمـة كـل منهمـا بين الصفر والواحد).

إن هذه الصفة المدهشة للحقيقة الكمومية - والتي هي بالتحديد أننا يجـب أن نـأخذ مـأخذ الجد إمكان أن يوجـد جسيم مـا، بطـرق مختلفـة، "في مكـانين في آن واحـد" - تنشـأ مـن أن الحالات الكمومية يمكن أن تُجمع، أو على الأصح أن تركَّب بعضها مـع بعـض "بتثقيـل" يعـبر عنه بأعداد عقدية، بحيث يتم تشكيل حالة كمومية جديـدة. إن ضـمّ الحـالات الكمومية علـى هذا النحو هو صفة مميزة عامة - وأساسـية - مـن صفـات ميكـانيك الكـم وتدعـى ***الانضمام الخطي الكمومي*** quantum linear superposition . وبفضل هذا الانضمـام نسـتطيع تشـكيل حالة اندفاع من ضم حالات موضع أو تشكيل حالة موضع من ضم حالات اندفاع. وفي كلتـا هاتين الحالتين يتم ضم مجموعة ***لانهائية*** من الحالات المختلفة، أي كل حـالات الموضـع أو كـل حالات الاندفاع. لكن انضمام حالتين فقط، هو أمر يثـير الحـيرة كمـا رأينـا. إن القـاعدة هـي التالية: أي ***حالتين***، مهما كانتا، وبغض النظر عن مدى اختلاف إحداهما عن الأخـرى، يمكـن أن توجدا معاً ضمن تركيب (أو انضمام) خطي عقدي. وفي الحقيقة إن أي جسم فيزيائي، هـو نفسه مؤلف من جسـيمات مفـردة، ينبغـي إذن أن يتمكـن مـن أن يوجـد في حالـة ناشـئة مـن انضمام حالات متباعدة مكانيـاً وأن يكـون إذن موجـوداً "في مكـانين في آن واحـد"! لايفـرق ميكانيك الكم، في هذا الخصوص، بين الجسيمات المفردة والجمل المعقدة المؤلفة من عـدد كبـير مـن الجسـيمات. فلمـاذا إذن، والحـال كذلـك، لانشـاهد أجسـاماً جهرية (ماكروســكوبية)، ككرات المضرب مثلاً، أو حتـى الأشـخاص، موجـودة في مكـانين مختلفـين في آن واحـد؟ إنـه سؤال ليس بإمكان النظرية الكمومية حالياً أن تجيب عنه إجابـة مرضيـة. فبالنسـبة لجسـم كبـير مثل كرة المضرب يجب أن نأخذ بالحسبان أنه جملة في "المستوي الكلاسيكي" - أو كمـا يقـال عادة، إن "رصداً" أو "قياساً" قد أجري على الجملة - وأن سعات الاحتمال العقدية التي تعطينا "وزن" (أو تثقيل) كل حد من حدود الانضمام يجب إذن أن تؤخـذ "مربعـات طويلاتهـا" وأن تعامل على أنها احتمالات كل من الخيارات. والحقيقة أن هذا ليس جوابـاً عـن السـؤال الـذي سبق طرحه: لماذا كان لنا الحق، في مثل هذه الأحوال، تغيير القواعد الكمومية، أي الانتقال من U إلى R؟ ولكنني سأعود إلى هذا الموضوع مرة أخرى فيما بعد.

فضاء هلبرت

نذكر أنـه تم، في الفصـل الخـامس، إدخـال مفهـوم ***الفضـاء الطـوري*** بغيـة وصـف الجمـل الكلاسيكية. إن نقطة واحدة مـن الفضـاء الطـوري تمثـل الحالـة (الكلاسـيكية) لجملـة فيزيائيـة

كاملة. أما في النظرية الكمومية فالمفهوم المقابل للفضاء الطوري هو ***فضاء هلبرت**** . وتمثل نقطة واحدة من فضاء هلبرت ***الحالة الكمومية*** لجملة كاملة. وسوف نحتاج لأخذ فكرة عن البنية الرياضية لهذا الفضاء، وأملي ألاّ يثبط هذا همة القارئ، فليس فيما سأقوله ماهو شديد التعقيد رياضياً على الرغم من أن بعض الأفكار يمكن أن تبدو غير مألوفة.

إن الخاصة الأساسية لفضاء هلبرت هو أنه فضاء متجهات vector space، وبالأحرى فضاء متجهات ***عقدية***. وهذا يعني أن من الممكن جمع أي عنصرين من عناصر الفضاء والحصول على عنصر آخر من الفضاء نفسه. كما يمكن كذلك إجراء عمليات جمع العناصر بعد تثقيلها بأوزان عقدية. ومن المفروض أن يكون إجراء مثل هذه العمليات ممكناً، لأنها عمليات ***الانضمام الخطي الكمومي*** الذي كنا بصدد الحديث عنه منذ قليل، وهي بالتحديد العمليات من النوع الذي يعطينا $\psi_t + \psi_b$ و $\psi_t - i\psi_b$ و $\psi_t + i\psi_b$ ..إلخ، في حالة الفوتون الذي عالجنا مسألته أعلاه. وخلاصة القول إن مانعنيه بتعبير "فضاء متجهات عقدية" هو أن بإمكاننا إجراء عمليات من هذا النوع(5).

وسيكون من المناسب استخدام رموز (يعود الفضل فيها أساساً إلى ديراك) يشار وفقها إلى عناصر فضاء هلبرت - التي تدعى متجهات الحالة - برمز ضمن قوس على شكل زاوية مثل $|\psi\rangle, |\chi\rangle, |\varphi\rangle, |1\rangle, |2\rangle, |3\rangle, |n\rangle, |\uparrow\rangle, |\downarrow\rangle, |\rightarrow\rangle, |\nearrow\rangle$ ..إلخ. وسوف تدل هذه الرموز من الآن فصاعداً على الحالات الكمومية. تكتب عملية جمع حالتين ببساطة كما يلي:

$$|\psi> + |\chi>$$

وفي حالة التثقيل بالعددين العقديين **w** و **z** يكون التركيب الخطي كما يلي:

$$w\,|\psi> + z\,|\chi>$$

(حيث يعني $w|\psi\rangle$ الجداء $w \times |\psi\rangle$ وهكذا..). وتبعاً لذلك فإننا نكتب التراكيب السابقة $\psi_t+\psi_b$ و $\psi_t - \psi_b$ و $\psi_t+ i\psi_b$ بالصورة التالية: $|\psi_t>+|\psi_b>$ و $|\psi_t>-|\psi_b>$ و $|\psi_t>+ i|\psi_b>$ على الترتيب. ويمكننا كذلك أن نضرب حالة (أو متجهة) $|\Psi>$ بعدد عقدي w، ونحصل بالنتيجة على المتجهة:

$$w|\psi>$$

(وماهذه في الحقيقة سوى حالة خاصة من التركيب السابق المذكور قبل عدة أسطر، وذلك حين يكون z=o).

---

* أدخل دافيد هلبرت، الذي سبق لنا الحديث عنه في فصول سابقة، هذا المفهوم الهام - في حالة عدد محدود من الأبعاد - قبل اكتشاف ميكانيك الكم بزمن طويل، وكان ذلك لأغراض رياضية مختلفة تماماً.

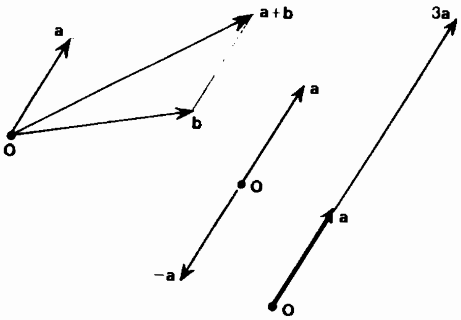
نذكر أننا أتحنا إمكان وجود تراكيب عقدية لاتكون فيها w و z هي سعات الاحتمال نفسها، وإنما تكون ***متناسبة*** مع هذه السعات. وتبعاً لذلك فإننا سوف نتبنى القاعدة القائلة أن بإمكاننا أن نضرب متجهة حالة بعدد عقدي لايساوي الصفر دون أن يؤدي هذا إلى تغير الحالة الفيزيائية. (ربما غيرت هذه العملية قيمتي w و z، لكن نسبتهما w/z تبقى هي ذاتها). إن كلاً من المتجهات:

$|\psi\rangle$ و $2|\psi\rangle$ و $-|\psi\rangle$ و $i|\psi\rangle$ و $\sqrt{2}|\psi\rangle$ و $\pi|\psi\rangle$ و $(1-3i)|\psi\rangle$..إلخ تمثل الحالة الفيزيائية نفسها التي تمثلها، بصورة عامة، المتجهة $z|\psi\rangle$ ، حيث z لاتساوي الصفر. والعنصر الوحيد، من عناصر فضاء هلبرت، الذي لايقابل حالة فيزيائية هو المتجهة ***صفر*** 0 (أي ***مبدأ*** فضاء هلبرت).

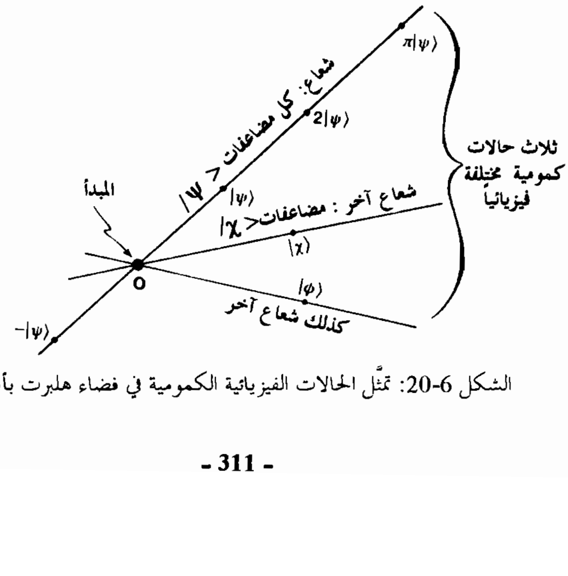
وبغية التوصل إلى تصور محسوس وهندسي لكل هذا سيكون من المفيد أن نفكر بالمفهوم المألوف لدينا للمتجهة "الحقيقية" العادية. تمثَّل عادة مثل هذه المتجهة ***بسهم*** مرسوم في مستوٍ أو في فضاء ثلاثي الأبعاد. ويتم جمع اثنتين من هذه المتجهات بتطبيق قاعدة متوازي الأضلاع (الشكل 6-19). أما عملية ضرب متجهة بعدد (حقيقي) فتتم، في صورة التمثيل بأسهم، بضرب طول السهم بالعدد مع إبقاء اتجاه السهم كما هو. وإذا كان العدد الذي نضرب المتجهة به سالباً انعكس اتجاه السهم، وإن كان العدد صفراً كانت نتيجة الضرب هي المتجهة صفر 0 التي ليس لها اتجاه. (تمثَّل المتجهة 0 بسهم صفر طوله يساوي الصفر). وأحد الأمثلة على المقادير المتجهة هو القوة المؤثرة في جسيم. وكذلك السرعة والتسارع والاندفاع هي أمثلة أخرى على المقادير المتجهة. ويجب ألا تغرب عن بالنا كذلك متجهات الاندفاع الرباعية (الطاقة – الاندفاع) التي مرّ ذكرها في نهاية الفصل السابق بمناسبة الحديث عن النظرية النسبية، والتي هي متجهات أيضاً إنما في فضاء ***ذي أربعة*** أبعاد، بدلاً من بعدين أو ثلاثة. أما في فضاء هلبرت فتكون المتجهات ذات عدد من الأبعاد أكبر بكثير (ويكون في كثير من الأحيان لانهائياً، ولكن هذا لايغير شيئاً مما سيلي). ولابد أن نتذكر هنا أن الأسهم استخدمت كذلك لتمثيل المتجهات في الفضاء الطوري الكلاسيكي، وأن عدد الأبعاد في هذه الحالة يمكن أن يكون كبيراً جداً كذلك. لكن "الأبعاد" في الفضاء الطوري لاتمثل الاتجاهات المكانية العادية، وكذلك الأمر بالنسبة لفضاء هلبرت. وفي الواقع فإن كل بعد من أبعاد فضاء هلبرت يقابل إحدى الحالات الفيزيائية المختلفة المستقلة للجملة الكمومية.

نظراً للتكافؤ بين $|\psi\rangle$ و $z|\psi\rangle$ فإن حالة فيزيائية ما تقابل في الواقع ***مستقيماً كاملاً ماراً من المبدأ*** 0 لفضاء هلبرت (وليس متجهة معينة على هذا المستقيم) وهو مانسميه شعاعاً ray، وهو يمثل كل مضاعفات متجهة الحالة $|\psi\rangle$. ويجب ألا ننسى أن هذه المضاعفات ***عقدية*** مما يجعل المستقيم في الحقيقة مستقيماً ***عقدياً***، لكن من الأفضل ألا نكترث كثيراً لهذه التفاصيل الآن. (أنظر الشكل 6-20). وسوف نرى بعد قليل أنه توجد طريقة أنيقة لتمثيل هذه الأشعة في

حالة فضاء هلبرت ذي البعدين. وفي النهاية الحدية الأخرى هناك فضاءات هلبرت ذات الأبعاد اللامنتهية، وهذه ليست نادرة لأن الحالة البسيطة التي ننظر فيها في موضع حسيم وحيد تتطلب فضاء هلبرت لامنتهي الأبعاد، إذ إن كل موضع من مواضع الجسيم يحدد "محوراً كاملاً" من محاور الإحداثيات في فضاء هلبرت بحيث يكون لدينا عدد لامنته من الاتجاهات المستقلة المختلفة (أو الأبعاد) التي تقابل العدد اللامنتهي من مواضع الجسيم المختلفة. أما حالات الاندفاع فتمثّل في فضاء هلبرت *نفسه* بشكل تراكيب من حالات الموضع بصورة تكون معها كل حالة اندفاع مقابلة لمحور قطري مائل بالنسبة لمحاور فضاء المواضع. وتشكل مجموعة كل حالات الاندفاع جملة محاور جديدة ممكنة، أما الانتقال من محاور فضاء المواضع إلى محاور فضاء الاندفاعات فيتم بوساطة *دوران* في فضاء هلبرت.

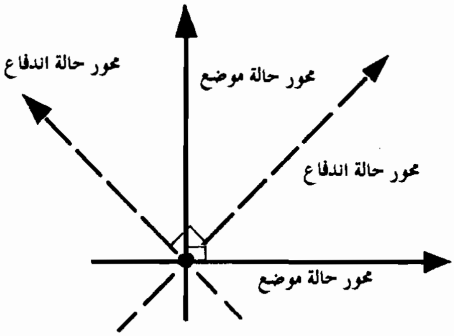


الشكل 6-19: يمكن تصور جمع متجهتين في فضاء هلبرت، وضرب متجهة بعدد (هنا 1- و 3) بالطريقة نفسها كما في حالة جمع متجهتين أو ضرب متجهة بعدد في الفضاء العادي.



الشكل 6-20: تمثّل الحالات الفيزيائية الكمومية في فضاء هلبرت بأشعة.

لايجوز أن نحاول رسم هذه الأشياء بصورة دقيقة، لأنه لن يكون لمثل هذه المحاولة معنى. لكن بعض أفكار الهندسة الإقليدية حين "نستعيرها" لفضاء هلبرت تبدو مفيدة جداً، وبصورة خاصة ينبغي أن تكون المحاور التي كنا بصددها (سواء أكانت محاور فضاء المواضع أو محاور فضاء الاندفاعات) ***متعامدة*** كلها أحدها مع الآخر، أي يجب أن تكون الزاوية بين كل أثنين منهما زاوية قائمة. إن "تعامد" الأشعة مفهوم هام في ميكانيك الكم لأن شعاعين متعامدين يقابلان حالتين ***مستقلتين*** إحداهما عن الأخرى. فحالات الموضع المختلفة لجسيم كلها متعامدة إحداها مع الأخرى، وكذلك الأمر بالنسبة لكل حالات الاندفاع المختلفة الممكنة. لكن حالات الموضع ليست متعامدة مع حالات الاندفاع، وهذا مايوضحه الشكل 6-21 بصورة تخطيطية جداً.



الشكل 6-21: توفر حالات الموضع وحالات الاندفاع خيارين ممكنين للمحاور المتعامدة في فضاء هلبرت نفسه.

القياس

يتطلب تطبيق القاعدة العامة R بغرض ***القياس*** (أو الرصد) أن تكون مختلف مظاهر الجملة الكمومية التي يمكن تضخيمها كلها في الوقت نفسه إلى المستوى الكلاسيكي – والتي على الجملة أن تختار من بينها – أن تكون ***متعامدة*** دوماً فيما بينها. فإذا كان القياس ***كاملاً***، شكلت مجموعة الخيارات جملة متعامدة من متجهات القاعدة، مما يعني أنه يمكن التعبير عن كل متجهة من فضاء هلبرت بشكل تركيب خطي (وحيد) من هذه المتجهات. فمن أجل قياس ***الموضع*** – في حال منظومة مكونة من جسيم واحد – تعين متجهات القاعدة هذه جملة محاور الموضع التي كنا بصددها في الفقرة السابقة. أما في حالة قياس ***الاندفاع*** فنحصل على جملة متجهات قاعدة أخرى تعين محاور الاندفاع، وفي قياس كامل من نوع آخر نجد جملة أخرى. وبعد القياس "تقفز"† حالة المنظومة إلى أحد محاور الجملة الذي يعينه القياس المجرى – أما اختيار هذا المحور من جملة المحاور الأخرى المشابهة له فهو من طبيعة احتمالية بحتة، إذ لايوجد قانون ديناميكي

† يقال كذلك أن متجهة حالة المنظومة تُسقط، بنتيجة إجراء القياس، على أحد محاور الجملة.

يمكن أن يخبرنا أياً من المحاور سوف تختار الطبيعة. فاختيارها عشوائي وقيم الاحتمال المقابلة هي مربعات طويلات السعات الكمومية.

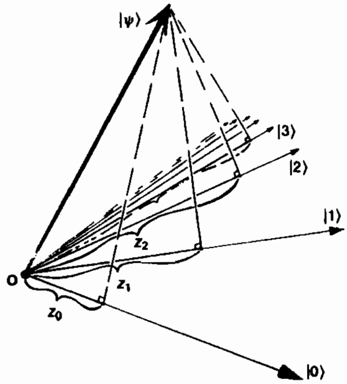
لنتصور أنه أُجري قياس كامل على منظومة حالتها <ψ|، بحيث أن القاعدة المقابلة لهذا القياس هي:

$$|0>, |1>, |2>, |3>, ...$$

بما أن متجهات القاعدة هذه تشكل مجموعة كاملة، فإن أي متجهة حالة، وبصورة خاصة <ψ|، يمكن أن يعبَّر عنها بشكل تركيب خطي من هذه المتجهات* :

$$|\psi> = z_0|0> + z_1|1> + z_2|2> + z_3|3> + ...$$

ومن وجهة النظر الهندسية فإن المركّبات z_0 و z_1 و z_2 ... تعطي قياس مساقط المتجهة <Ψ| على المحاور المختلفة <0| و <1| و <2|... (أنظر الشكل 6-22).



الشكل 6-22: تعطي المساقط العمودية للحالة <ψ| على متجهات القاعدة <0| و <1| و <2|... سعات الاحتمال المقابلة z_0 و z_1 و z_2 ...

بودنا لو كان بإمكاننا النظر إلى الأعداد العقدية z_0 و z_1 و z_2 ... إلخ على أنها السعات الاحتمالية المطلوبة، أي تلك التي تكون مربعات طويلاتها هي احتمالات أن توجد الجملة، بعد القياس، في إحدى الحالات المقابلة <0| و <1| و <2|...إلخ. لكن هذا غير ممكن طالما أننا لم نحدد "مقاييس" المتجهات <0| و <1| و <2|... ولعمل هذا يكفي أن نفترض أن هذه المتجهات هي ***المتجهات الواحدية*** (أي أن "طول" كل منها يساوي الواحد). وبهذه الطريقة يتشكل مايسمى، حسب التعبير الرياضي، بالقاعدة ***المتعامدة النظامية*** (قاعدة متجهاتها متعامدة مثنى مثنى وطول كل منها يساوي الواحد)(6). فإذا كانت المتجهة <ψ| مستنظمة أيضاً لكي

* يقتضي هذا الإجراء أن يكون لنا الحق في افتراض أن عدد المتجهات ***غير منته***. وإن التعريف ***الكامل*** لفضاء هلبرت (والذي هو أعقد من أن أدخل في تفاصيله هنا) يتضمن القواعد المتعلقة بإجراء مثل هذا الجمع اللامنتهي.

يصبح طولها يساوي الواحد، كانت السعات المطلوبة هي بالفعل مركّبات $|\psi>$ أي : $|z_0>$ و $|z_1>$ و $|z_2>$ و..إلخ. وكانت الاحتمالات النسبية المقابلة هي $|z_0|^2$ و $|z_1|^2$ و $|z_2|^2$ و..إلخ. أما إذا لم تكن $|\psi>$ متجهة وحدة كانت هذه الأعداد متناسبة مع السعات المطلوبة وكانت مربعات طويلاتها متناسبة مع الاحتمالات، وكانت السعات الفعلية هي:

$$z_0/|\psi> \text{ و } z_1/|\psi> \text{ و } z_2/|\psi> \text{ و } \ldots\ldots \text{إلخ}$$

وكانت الاحتمالات الفعلية هي:

$$|z_0|^2/|\psi|^2 \text{ و } |z_1|^2/|\psi|^2 \text{ و } |z_2|^2/|\psi|^2 \text{ و } \ldots\text{ألخ}$$

حيث تمثل $|\psi|$ "طول" متجهة الحالة $|\psi>$. وهذا الطول هو عدد حقيقي موجب معين بالنسبة لكل متجهة حالة، (أما طول المتجهة 0 فهو صفر)، وحيث $|\psi| = 1$ حين تكون $|\psi>$ مستنظمة (متجهة واحدية).

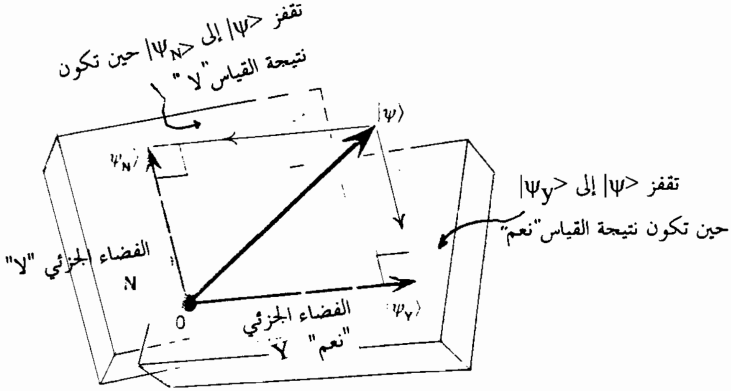
إن القياس الكامل هو نوع مثالي جداً من القياسات. فالقياس الكامل لموضع جسيم، على سبيل المثال، يتطلب منا أن نكون قادرين على تحديد موضع الجسيم بدقة لامتناهية في أي مكان كان في الكون! هناك نوع آخر من القياسات، أكثر بساطة، يتلخص في أن نسأل سؤالاً يكون جوابه نعم أو لا، كمثل سؤالنا: "هل يقع الجسيم على يمين، أو على يسار، خط ما؟ "أو كمثل السؤال: "هل يقع اندفاع الجسيم في هذا المجال، أو ذاك؟". إن القياسات من النوع نعم/لا هي في الحقيقة قياسات أساسية أكثر من باقي الأنواع (يمكن للمرء، مثلاً، أن يقترب بقدر مايشاء من موضع الجسيم، أو اندفاعه، باستخدام سلسلة كافية من القياسات نعم/لا). لنفترض أن نتيجة قياس من النوع نعم/لا كانت نعم (YES). عندئذٍ يجب أن تكون متجهة الحالة في المنطقة "نعم" (YES) من فضاء هلبرت التي سأدعوها اختصاراً Y. وبالعكس إذا كانت نتيجة القياس "لا" (NO) فستكون متجهة الحالة في المنطقة "لا" (NO)، أو اختصاراً، N. وتكون المنطقتان Y و N متعامدتين تماماً إحداهما مع الأخرى، بمعنى أن أية متجهة حالة من المنطقة Y تكون متعامدة بالضرورة مع كل متجهات الحالة من المنطقة N (والعكس بالعكس). وعدا عن ذلك فإنه يمكن التعبير عن أية متجهة حالة $|\psi>$ (وبطريقة وحيدة) على شكل مجموع متجهتين إحداهما من Y والأخرى من N. ونقول بلغة الرياضيات أن Y و N هما فضاءان جزئيان ***متتامان ومتعامدان***. ويعبَّر إذن عن $|\psi>$ بالصورة (الوحيدة) التالية:

$$|\psi> = |\psi_Y> + |\psi_N>$$

حيث $|\psi_Y>$ تخص Y و $|\psi_N>$ تخص N. إن $|\psi_Y>$ هي المسقط العمودي للحالة $|\psi>$ على Y و $|\psi_N>$ هي مسقطها على N (أنظر الشكل 6-23)

تقفز الحالة $|\psi>$ لدى إجراء القياس وتتحول إما إلى $|\psi_Y>$ أو إلى $|\psi_N>$ (أو على الأصح تصبح متناسبة مع إحداهما). فإذا كانت نتيجة القياس "نعم" قفزت الحالة $|\psi>$ إلى $|\psi_Y>$، أما إذا كانت "لا" قفزت إلى $|\psi_N>$ فإذا كانت $|\psi>$ مستنظمة كان احتمال حدوث كل من

هذين الأمرين مساوياً **مربع مسقط الحالة** $|\psi_Y|^2$ أو $|\psi_N|^2$ على الترتيب. أما إذا لم تكن $|\psi\rangle$ مستنظمة وجب تقسيم كل من هذين المقدارين على $|\psi|^2$. (تضمن نظرية فيثاغورس $|\psi_N|^2 + |\psi_Y|^2 = |\psi|^2$ أن يكون مجموع هذين الاحتمالين مساوياً الواحد، كما ينبغي أن يكون!). لنلاحظ أن احتمال أن تقفز $|\psi\rangle$ إلى $|\psi_N\rangle$ يساوي المعامل الذي ينقص به مربع طولها لدى عملية الإسقاط.



الشكل 6-23: اختزال متجهة الحالة. يمكن تمثيل القياس من النوع نعم/لا بفضاءين جزئيين Y (YES) و N (NO) متعامدين ومتتامين. لدى القياس تقفز الحالة $|\psi\rangle$ إلى مسقطها إما على هذا الفضاء الجزئي أو على الآخر، وذلك باحتمال يساوي المعامل الذي ينقص به مربع طول متجهة الحالة لدى الاسقاط.

هناك نقطة أخيرة يجب التوقف عندها تتعلق "بعمليات القياس" التي يمكن إجراؤها على جملة كمومية. فمبادئ النظرية الكمومية تتطلب أن يوجد من حيث المبدأ بالنسبة ***لأية حالة مهما كانت*** – ولتكن الحالة $|\chi\rangle$ – قياس، من النوع نعم/لا(7)، يمكن إجراؤه بحيث تكون نتيجته "نعم" إذا كانت الحالة المقيسة هي $|\chi\rangle$ (أو حالة متناسبة معها) وتكون "لا" إذا كانت الحالة المقيسة متعامدة مع $|\chi\rangle$. وتكون المنطقة Y المعرّفة سابقاً مشكلة من كل مضاعفات حالة معينة مثل $|\chi\rangle$. ويبدو أن هذا يستلزم، استلزاماً قوياً إلى حد ما، أن تكون متجهات الحالة ***حقيقية موضوعياً***. بالفعل، مهما كانت حالة الجملة – ولتكن $|\chi\rangle$ – فإنه توجد، ***من حيث المبدأ***، عملية قياس تكون $|\chi\rangle$ هي الحالة الوحيدة (بحدود ثابت متناسب) التي يعطي القياس من أجلها النتيجة "نعم" ***بصورة مؤكدة***. وعلى الرغم من أنه قد يكون إجراء مثل هذا القياس، في بعض الحالات، في أقصى درجات الصعوبة، بل ربما يكون "مستحيلاً" من الناحية العملية، لكننا سنرى فيما بعد في هذا الفصل، أنه تترتب نتائج مدهشة على حقيقة أن النظرية تتيح، ولو ***من حيث المبدأ***، إجراء مثل هذا القياس.

السبين وكرة ريمان

يشتهر المقدار المسمى في ميكانيك الكم سبين (spin) بأنه أكثر المقادير الفيزيائية كلها "كمومية". ولذلك سيكون من الصواب أن نعيره الاهتمام الذي يستحقه. ماهو السبين؟ إنه في الأساس قياس دوران مرتبط بجسيم. وكلمة سبين ذاتها† تذكّر بالفعل بشيء ما يدور حول نفسه، كما هو الأمر مثلاً بالنسبة لطابة حين تلف حول نفسها. لنتذكر مفهوم الاندفاع الزاوي (أو عزم الاندفاع) الذي يخضع، شأنه في ذلك شأن الطاقة والاندفاع، لقانون ***انحفاظ*** (انظر الفصل الخامس ص 209 وص 281). يبقى ***الاندفاع الزاوي*** لجسم ما محفوظاً مع مرور الزمن مالم تؤثر في الجسم قوى احتكاك، أو أي نوع آخر من القوى. وماسبين ميكانيك الكم إلا من هذا النوع بالذات، فيما عدا أنه يتعلق بدوران جسيم وحيد حول نفسه وليس بدوران عدد هائل من الجسيمات حول مركز كتلتها (كما في حالة الطابة). وإنها لحقيقة فيزيائية على قدر كبير من الأهمية أن معظم الجسيمات الموجودة في الطبيعة "تدور" فعلاً حول نفسها بهذا المعنى للدوران، كل منها وفقاً لمقدار مميز خاص به [8]. إلاّ أننا سوف نرى أن لسبين الجسيم الكمومي الفرد بعض الخواص الفريدة التي تختلف كل الاختلاف عما اعتدناه من خبرتنا حول دوران الأجسام، كالطابات وماشابهها، حول أنفسها.

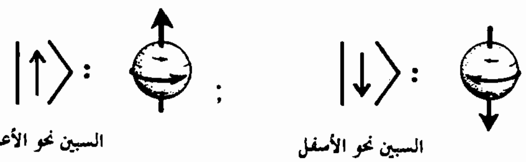
فقبل كل شيء إن ***لمقدار*** سبين جسيم ما القيمة ***ذاتها*** دوماً لكل نوع من الجسيمات، وإن منحى محور السبين هو وحده الذي يمكن أن يتغير (وبصورة غريبة جداً كما سنرى فيما بعد). وهذا شيء يتناقض تناقضاً صارخاً مع حالة الطابة التي يمكنها أن تدور بكل الأشكال المختلفة تبعاً للطريقة التي دُحرجت بها! إن مقدار سبين الإلكترون أو البروتون أو النترون هو دوماً $\hbar/2$، أي أنه يساوي بالضبط ***نصف القيمة*** الدنيا الموجبة التي أعطاها بور للاندفاع الزاوي المكمم للذرة. (لنتذكر أن القيم الممكنة حسب بور هي 0 و $\hbar$ و $2\hbar$ و $3\hbar$...). وهذه القيمة $\hbar/2$ هي نصف الواحدة الأساسية $\hbar$، وهي التي يجب أن تكون، بمعنى ما، الواحدة الأساسية الحقيقية، وقيمة الاندفاع الزاوي هذه (أي $\hbar/2$) يستحيل أن تكون لجسم مؤلف من جسيمات تدور على مدارات والتي لايدور أي منها حول نفسه – وهذا دليل على أن السبين هو خاصة ذاتية من خواص الجسيم نفسه (أي أنه ليس ناشئاً من أية حركة مدارية "لأجزاء" الجسيم حول مركز ما).

يدعى الجسيم الذي يساوي سبينه ***عدداً فردياً*** من $\hbar/2$ (أي يساوي $\hbar/2$ أو $3\hbar/2$ أو $5\hbar/2$...إلخ) فرميوناً fermion. وتبدي مثل هذه الجسيمات خاصة كمومية غريبة ومثيرة للفضول: فدوران كامل بمقدار 360° لايعيد متجهة حالة الجسيم إلى ماكانت عليه قبل الدوران وإنما إلى المتجهة نفسها بعد ***تغيير إشارتها***. إن الكثير من الجسيمات الموجودة في الطبيعة هي

† تعني كلمة "spin" الإنكليزية دوران الجسم بسرعة حول نفسه.

فرميونات، وسوف تتاح لنا الفرصة فيما بعد لكي نعود ونتعرف على المزيد من خواصها وسلوكها الغريب - إنما الأساسي جداً حتى بالنسبة لوجودنا نفسه -. أما الجسيمات الأخرى ذات السبين المساوي مضاعفاً ***زوجياً*** من $\hbar/2$، أي عدداً صحيحاً من $\hbar$، (وبالتحديد يساوي 0 أو $\hbar$ أو $2\hbar$ أو $3\hbar$...إلخ) فتدعى بوزونات bosons. ولدى الدوران بمقدار $360°$ فإن متجهة حالة البوزون تعود ***إلى نفسها*** دون أن تتغير إشارتها.

لننظر في جسيم ذي سبين ½، أي قيمة سبينه $\hbar/2$، وبغية الوضوح، لنفترض أن هذا الجسيم ***هو إلكترون***، على الرغم من أن البروتون أو النترون أو حتى أية ذرة سبينها يساوي $\hbar/2$، يصلح تماماً كذلك. (مايهمنا هنا هو "جسيم"، وإن كان مؤلفاً من "أجزاء" مستقلة، طالما أنه يمكن معاملته كمومياً ككل ذي اندفاع زاوي كلي محدد تماماً). سننظر إلى الإلكترون على أنه ساكن وسنبحث في حالته السبينية فقط. يصبح فضاء الحالات الكمومية عندئذٍ (فضاء هلبرت) لهذه الجملة فضاءً ذا ***بعدين*** ويمكن إذن أن يوصف بوساطة قاعدة مؤلفة من ***حالتين*** فقط. سأرمز لهاتين الحالتين بالرمزين $|\uparrow\rangle$ و $|\downarrow\rangle$ وذلك لكي أدل على أنه حين يكون الإلكترون في الحالة السبينية $|\uparrow\rangle$ فإن سبينه يقابل دوراناً وفق قاعدة اليد اليمنى بالنسبة للمحور الشاقولي الموجه نحو الأعلى، بينما حين يكون في الحالة السبينية $|\downarrow\rangle$ فإن سبينه يقابل دوراناً نحو اليمين بالنسبة للمحور الشاقولي الموجه نحو الأسفل[†] (أنظر الشكل 6-24). إن الحالتين $|\uparrow\rangle$ و $|\downarrow\rangle$ متعامدتان إحداهما مع الأخرى وسنفترض أنهما مستنظمتان (أي أن $|\uparrow|^2 = |\downarrow|^2 = 1$). إن أية حالة سبينية ممكنة للإلكترون هي تركيب خطي من هاتين الحالتين المتعامدتين والمستنظمتين، اللتين سندعوهما كذلك: ***نحو الأعلى*** (up) ***ونحو الأسفل*** (down)، كأن تكون مثلاً $w|\uparrow\rangle + z|\downarrow\rangle$



الشكل 6-24: تتألف قاعدة حالات سبين الإلكترون من حالتين فقط يشار إليهما عادة بحالة السبين نحو الأعلى (up) ونحو الأسفل (down).

لنلاحظ أنه مامن شيء خاص يميز الاتجاهين "نحو الأعلى" و "نحو الأسفل"، فقد كان بإمكاننا مثلاً أن نختار، وبصورة مكافئة تماماً، أيَّ اتجاهين آخرين لوصف السبين، وليكونا

[†] ينبغي التأكيد على أنه لايجوز أن يُفهم من هذا أن الجسيم نفسه يدور حول محور مار من مركزه. فالسبين، كما سبق وذُكر، خاصة كمومية ذاتية من خواص الجسيم لاتنشأ من الحركة الدورانية لأجزاء الجسيم حول مركزه. وما المقابلة هنا، وفيما سيلي، بين الحالة السبينية والدوران حول محور إلا من باب تبسيط الأمور وجعلها في متناول التصور.

الاتجاهين ***نحو اليمين ونحو اليسار*** أي بوساطة الحالتين السبينيتين المتعامدتين والمستنظمتين $|\rightarrow\rangle$ و $|\leftarrow\rangle$. ومن السهل أن نبين عندئذٍ أن* :

$$|\rightarrow\rangle = |\uparrow\rangle + |\downarrow\rangle$$

و

$$|\leftarrow\rangle = |\uparrow\rangle - |\downarrow\rangle$$

وهذا يوصلنا إلى طريقة جديدة ننظر بها إلى سبين الإلكترون: فأية حالة من حالاته السبينية هي تركيب خطي من الحالتين المتعامدتين $|\rightarrow\rangle$ و $|\leftarrow\rangle$ اللتين نسميهما ***"نحو اليمين" و "نحو اليسار"***. لقد كان بإمكاننا كذلك أن نختار، عوضاً عن ذلك، أي اتجاه آخر، وليكن الاتجاه المعطى بمتجهة الحالة $|\nearrow\rangle$. وهذه الحالة هي أيضاً تركيب خطي من $|\uparrow\rangle$ و $|\downarrow\rangle$:

$$|\nearrow\rangle = w\,|\uparrow\rangle + z\,|\downarrow\rangle$$

إن أية حالة سبينية يمكن أن تمثَّل بصورة تركيب خطي من هذه الحالة $|\nearrow\rangle$ والحالة المتعامدة معها $|\swarrow\rangle$ المتجهة في الاتجاه المعاكس(9). (ينبغي أن نلاحظ أن مفهوم "التعامد" في فضاء هلبرت لايقابل بالضرورة "زاوية قائمة" في الفضاء العادي. فمتجهات فضاء هلبرت المتعامدة في حالتنا هذه تقابل الاتجاهات المتعاكسة قطرياً في الفضاء، وليس الاتجاهات التي تشكل فيما بينها زوايا قائمة.)

هل يمكن، ياترى، إيجاد علاقة هندسية بين الاتجاه في الفضاء المعين بوساطة $|\nearrow\rangle$ والعددين العقديين w و z؟ بما أن الحالة الفيزيائية الممثَّلة بوساطة $|\nearrow\rangle$ تبقى هي ذاتها إذا ضربنا $|\nearrow\rangle$ بعدد عقدي لايساوي الصفر، ***فإن النسبة*** z/w هي وحدها التي لها معنى فيزيائي. لنضع:

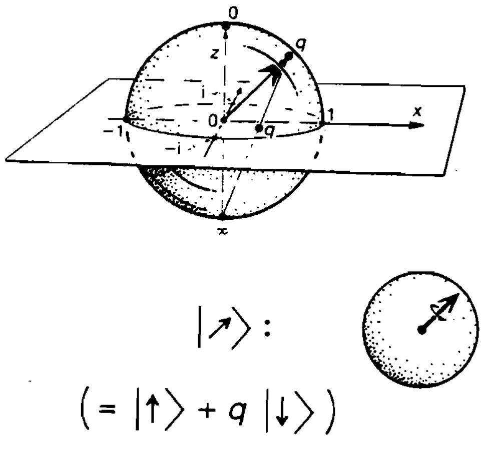
$$q = z/w$$

حيث q عدد عقدي عادي فيما عدا أن القيمة "$q = \infty$" ينبغي أن تكون ممكنة أيضاً وذلك لمعالجة الحالة التي تكون فيها $w = o$، أي الحالة التي يكون فيها اتجاه السبين نحو الأسفل. ويمكننا تمثيل q، مالم تكن مساوية ∞ ، بنقطة في مستوي آرغان تماماً كما فعلنا في الفصل الثالث. لنتخيل أن مستوي آرغان هذا هو مستو أفقي وأن اتجاه المحور الحقيقي فيه نحو اليمين (أي في اتجاه الحالة السبينية $|\rightarrow\rangle$ ولنتخيل كذلك كرة نصف قطرها يساوي الواحد ومركزها في مبدأ مستوي آرغان، بحيث أن النقاط 1 و i و 1- و i- تقع كلها على خط استواء الكرة. سنسمي النقطة الواقعة في القطب الجنوبي ∞ ، ولنسقط مستوي آرغان إسقاطاً مخروطياً على الكرة، ابتداء من هذه النقطة. وهكذا فإن أية نقطة q من مستوي آرغان تقابل نقطة وحيدة q على الكرة يتم الحصول عليها من تقاطع الكرة مع المستقيم الواصل بين قطب الكرة الجنوبي والنقطة q من

---

* أفضّل، كما مر في مناسبات سابقة أخرى، ألا أربك الكتابة بوضع الأمثال $\frac{1}{\sqrt{2}}$ على الرغم من أنها ضرورية لكي تكون كل من الحالتين $|\rightarrow\rangle$ و $|\leftarrow\rangle$ مستنظمة.

المستوي (الشكل 6-25). لدينا إذن مايسمى بالإسقاط المجسامي (الستيريوغرافي)† ، الذي يتمتع بالعديد من الخواص الهندسية الهامة (فهو، مثلاً، يحافظ على الزوايا ويُسقط الدوائر بشكل دوائر). وفي حالتنا الراهنة يتيح لنا هذا الإسقاط أن نربط كل نقاط الكرة بأعداد عقدية، بما فيها ∞ ، وبصورة أدق، بمجموعة القيم (العقدية) التي يمكن للنسبة q أن تأخذها. تدعى الكرة التي يتم وصفها بهذه الطريقة ***كرة ريمان*** Riemann. ولهذه الكرة، فيما يتعلق بحالات الإلكترون السبينية، معنى فيزيائي محدد: إن اتجاه السبين المقابل للحالة $|\nearrow\rangle = w|\uparrow\rangle + z|\downarrow\rangle$ هو اتجاه المستقيم الواصل بين مركز كرة ريمان والنقطة $q = z/w$ الواقعة عليها. ويمكن أن نلاحظ أن القطب الشمالي يقابل الحالة $|\uparrow\rangle$ المعطاة بالقيمة $z = 0$ (أي بالقيمة $q = 0$) وأن القطب الجنوبي يقابل الحالة $|\downarrow\rangle$ المعطاة بالقيمة $w = 0$ (وإذن $q = \infty$). وتوصف أقصى نقطة إلى اليمين بالقيمة $q = 1$ وهي تقابل الحالة $|\rightarrow\rangle = |\uparrow\rangle + |\downarrow\rangle$ والنقطة الواقعة خلف الكرة على خط استوائها بالقيمة $q = i$ وهي تقابل الحالة $|\uparrow\rangle + i|\downarrow\rangle$ ويكون السبين عندئذٍ بالاتجاه الذي يبتعد عنا، أما أقرب نقطة إلينا على خط الاستواء فتوصف بالقيمة $q = -i$ وهي تقابل الحالة $|\uparrow\rangle - i|\downarrow\rangle$ ويكون السبين عندها متجهاً نحونا مباشرة. وبصورة عامة فإن نقطة ما موصوفة بالقيمة q على كرة ريمان تقابل الحالة $|\uparrow\rangle + q|\downarrow\rangle$.



الشكل 6-25: كرة ريمان كتمثيل لفضاء الحالات السبينية المختلفة فيزيائياً لجسيم ذي سبين ½. يجري إسقاط مجسامي للكرة على مستوي آرغان يمر من خط استواء الكرة ابتداءً من قطبها الجنوبي (∞).

† إن هذا الإسقاط هو في الحقيقة تعاكس، بمعنى أن الكرة هي معاكس المستوي، والتعاكس يحافظ على الزوايا ومعكوس الدائرة دائرة، ومعكوس المستقيم دائرة.

لكن ماهي الرابطة بين كل هذا والقياسات التي يمكن أن نجريها على سبين الإلكترون؟[10] لنختر إتجاهاً ما في الفضاء معرَّفاً بالزاوية α. فإذا أجرينا قياس سبين الإلكترون في هذا الإتجاه كان الجواب "نعم" يعني أن الإلكترون يدور (الآن) حول نفسه في الاتجاه اليميني بالنسبة للمحور α، بينما تعني "لا" أنه يدور في الاتجاه المعاكس.

لنفترض أن الجواب كان "نعم"؛ سنسمي حالة الإلكترون عندئذٍ $|\alpha\rangle$. إذا أعدنا إجراء القياس السابق مستخدمين الاتجاه α نفسه بالضبط كما في المرة الأولى وجدنا أن الجواب هو "نعم" دوماً باحتمال 100 بالمئة. أما إذا غيرنا الاتجاه لدى إجراء القياس الثاني، واخترنا إتجاهاً آخر معرفاً بالزاوية β، فسوف نجد أن احتمال الحصول على جواب "نعم" (حيث تقفز الحالة إلى الحالة $|\beta\rangle$) لم يعد مساوياً 100 بالمئة لأنه من غير المستبعد أنه لدى إجراء القياس الثاني، أن تقفز الحالة إلى تلك المقابلة للاتجاه المعاكس للاتجاه β، ويكون الجواب عندئذٍ "لا". كيف نحسب احتمال أن تقفز الحالة إلى $|\beta\rangle$؟ إن الجواب متضمن في تطبيق القواعد المذكورة في نهاية القسم السابق. إن احتمال الحصول على "نعم" لدى إجراء القياس الثاني هو:

$$(1 + \cos\theta)½$$

حيث θ هي الزاوية بين الاتجاهين α و β[11]. واحتمال الحصول على "لا" في القياس الثاني هو:

$$(1 - \cos\theta)½$$

ويمكننا أن نرى من هذا أنه إذا أجري القياس الثاني في اتجاه يشكل زاوية قائمة مع اتجاه القياس الأول كان احتمال الحصول على "نعم" أو "لا" بنتيجة القياس الثاني مساوياً 50 بالمئة في كلتا الحالتين (لأن $\cos 90° = 0$). أي أن نتيجة القياس عشوائية تماماً! أما إذا كانت الزاوية بين الاتجاهين α و β حادة كان احتمال الحصول على الجواب "نعم" أكبر من احتمال الحصول على الجواب "لا" وإذا كانت الزاوية منفرجة كان الجواب "لا" أكثر احتمالاً من الجواب "نعم". وفي الحالة الحدية حين يكون الاتجاهان α و β متعاكسين يصبح احتمال الجواب "نعم" صفراً بينما احتمال الجواب "لا" 100 بالمئة أي أن نتيجة القياس الثاني هي بالتأكيد معاكسة لنتيجة القياس الأول. (لمزيد من المعلومات حول قياس السبين راجع **Feynmann et al 1965**).

إن لكرة ريمان دوراً أساسياً (لكنه غير معترف به دوماً) لدى معالجة ***أية جملة*** كمومية ذات حالتين. فهي تتيح رؤية سلسلة الحالات الكمومية الممكنة (في حدود ثابت تناسب). ويكون دورها الهندسي ظاهراً للعيان بصورة خاصة في حالة الجسيم ذي السبين لأن نقاط الكرة تقابل عندئذٍ اتجاهات محور السبين الفضائية الممكنة. أما في الأحوال الأخرى فتكون رؤية دور كرة ريمان أقل وضوحاً. لننظر، مثلاً، في فوتون قد مرّ لتوه عبر شقين، أو قد انعكس على مرآة نصف شفافة. إن حالة هذا الفوتون هي تركيب خطي من النوع $|\psi_t\rangle + |\psi_b\rangle$ أو $|\psi_t\rangle - |\psi_b\rangle$ أو $|\psi_t\rangle + i|\psi_b\rangle$ من الحالتين $|\psi_t\rangle$ و $|\psi_b\rangle$ اللتين تصفان

موضعين مختلفين تماماً. وكرة ريمان تصف حتى هنا سلسلة الإمكانات المختلفة فيزيائياً إنما **بصورة تجريدية** فقط. إذ تمثّل الحالة $|\psi_t>$ بالقطب الشمالي (الموجود في "الأعلى") وتمثل $|\psi_b>$ بالقطب الجنوبي (في "الأسفل"). عندئذٍ تمثل الحالات $|\psi_b> + |\psi_t>$ و $|\psi_b> - |\psi_t>$ و $|\psi_t> + i|\psi_b>$ بنقاط مختلفة على خط الاستواء. وبصورة عامة تمثّل الحالة $w|\psi_t> + z|\psi_b>$ بالنقطة المرتبطة بالعدد $q = z/w$. وكثيراً ماتكون ثروة الإمكانات التي تقدمها كرة ريمان مخبأة، كما في هذه الحالة، بمعنى أنها ليست ذات علاقة واضحة بالهندسة العادية.

موضوعية الحالات الكمومية وقابليتها للقياس

على الرغم من أنه لايمكن التعبير عن نتائج القياس (المتوقعة) إلا على صورة احتمالات، إلا أن وجود شيء ما **موضوعي** في الحالة الكمومية يبدو شيئاً مؤكداً. وغالباً مايقال أن متجهة الحالة ليست سوى وصف ملائم "لمعرفتنا" المتعلقة بالجملة الفيزيائية، أو ربما يقال أن متجهة الحالة لاتصف بالفعل جملة واحدة وإنما هي تعطي معلومات من النوع الإحتمالي فقط حول "مجموعة" مؤلفة من عدد كبير من جمل محضَّرة كلها بصورة متماثلة. وهذه الآراء وأمثالها تدهشني كثيراً لأنها متخوفة في درجة غير معقولة، وبرأيي أن ميكانيك الكم يقول أكثر من هذا حول **حقيقة** العالم الفيزيائي.

ويبدو لي أن هذا الحذر، أو الشك، المتعلق "بالواقع الفيزيائي" لمتجهات الحالة نابع، إلى حد ما، من أن ما هو قابل للقياس فيزيائياً، بحسب النظرية نفسها، محدود جداً. لننظر في حالة الإلكترون السبينية كما شرحناها سابقاً. ولنفترض أن هذه الحالة السبينية هي الحالة $|\alpha>$، ولكننا لانعرفها، أي أننا لانعرف **الاتجاه** α الذي يفترض أن الالكترون يدور حول نفسه بحسبه. فهل من الممكن تعيين هذا الاتجاه بإجراء قياس؟ كلا، هذا غير ممكن. كل مايمكننا عمله هو استنتاج "نتفة" (bit)[†] من المعلومات، أي جواب نعم أو لا عن سؤال نطرحه. وبما أننا نجهل α فيمكننا أن نختار اتجاهاً آخر β ونقيس سبين الإلكترون فيه فنحصل إمّا على الجواب نعم أو على الجواب لا. ولكن بمجرد الحصول على هذا الجواب تكون كل المعلومات حول الاتجاه الأصلي للسبين قد فقدت. لأننا لو حصلنا على "نعم" عرفنا أن حالة سبين الإلكترون هي الآن $|\beta>$، وإذا كان الجواب الذي حصلنا عليه هو "لا" عرفنا أن اتجاه سبين الإلكترون في هذه اللحظة هو الإتجاه المعاكس لِ β. وعلى أية حال لايعلمنا هذا ماذا كان الإتجاه للسبين **قبل** إجراء القياس، ولانحصل من ذلك إلاّ على معلومات إحتمالية عنه.

† binary digit = bit وهي الوحدة الأساسية لقياس كمية المعلومات وتسمى أيضاً خانة إثنانية.

ومن ناحية أخرى نشعر أن الاتجاه نفسه، الذي كان يدور الإلكترون حول نفسه بحسبه قبل إجراء القياس، لابد ان يحوي شيئاً ما موضوعياً* . لأنه كان بإمكاننا مثلاً أن نختار إجراء قياس سبين الإلكترون في الاتجاه α بالضبط – وبما أننا نكون بذلك قد أصبنا في تخميننا، فإننا نحصل على الجواب "نعم" بصورة مؤكدة. إذن لابد أن تكون "المعلومات" التي ينبغي على الإلكترون أن يعطي هذا الجواب وفقها مخزنة بطريقة ما في حالة الإلكترون السبينية!

ويبدو لي أنه من الضروري التفريق بين ماهو "موضوعي" وما هو "قابل للقياس" لدى مناقشة موضوع الواقع الفيزيائي وفق ميكانيك الكم. فمتجهة الحالة لجملة ما ليست، في الواقع، قابلة للقياس، بمعنى أنه من غير الممكن، بإجراء التجارب المناسبة، أن نقول ماهي بالضبط (بحدود معامل تناسب)، لكن متجهة الحالة هذه تبدو أنها خاصة موضوعية تماماً (ومرة أخرى بحدود معامل تناسب) من خواص الجملة، لأن النتائج التي يجب أن تعطيها، لدى إجراء التجارب الممكنة، تعينها تعييناً كاملاً. ففي حالة جسيم مفرد ذي سبين ½، كالإلكترون مثلاً، تبدو هذه الموضوعية معقولة لأنها تؤكد فقط وجود اتجاه ما يكون سبين الإلكترون بحسبه محدداً بالضبط، بالرغم من أننا لانعرف بالضرورة هذا الاتجاه. (وعلى أية حال فسوف نرى فيما بعد أن هذه الصورة "الموضوعية" تصبح أكثر غرابة في حالة الجمل الأكثر تعقيداً – بل وحتى في حالة جملة مؤلفة من جسيمين فقط سبين كل منهما ½).

ولكن هل ينبغي حقاً أن يكون الإلكترون في حالة سبينية محددة فيزيائياً قبل إجراء القياس؟ في الواقع لايكون في مثل هذه الحالة في كثير من الأحيان، أي طالما أنه لايمكن اعتباره بحد ذاته جملة كمومية مستقلة. وبصورة عامة يجب أن ينظر إلى الحالة الكمومية على أنها تصف إلكتروناً مرتبطاً بصورة معقدة مع عدد كبير من الجسيمات الأخرى. إنما يمكن، في أحوال خاصة، اعتبار الإلكترون (على الأقل فيما يتعلق بسبينه فقط) كما لو كان مستقلاً بحد ذاته. ففي مثل هذه الظروف تدلنا النظرية الكمومية السائدة (القياسية) أن اتجاه سبين الإلكترون محدد تماماً، بشرط أن يكون قد جرى قياس مسبق للسبين في اتجاه ما (ربما غير معروف) وأن يكون الإلكترون قد بقي بعد ذلك فترة معينة من الزمن دون تأثير خارجي.

نَسْخ الحالات الكمومية

إن موضوعية حالة الإلكترون السبينية، إضافة إلى عدم قابليتها للقياس، هي مايوضح حقيقة أخرى هامة مفادها أنه ***يستحيل نسخ (أو تكرار) حالة كمومية مع الحفاظ على الحالة الأصلية دون تغيير***. لنتخيل أننا تمكنا من عمل نسخة من حالة الإلكترون السبينية $|\alpha\rangle$. فلو

* هذه الموضوعية هي أحد المظاهر الناتجة عن وجهة النظر المأخوذ بها هنا والمتمثلة بالتقيد التام بشكلية الميكانيك الكمومي السائدة (القياسية). أما من وجهة النظر اللاقياسية لهذه النظرية فيمكن للجملة أن "تعرف" مسبقاً النتيجة التي سيؤدي إليها هذا القياس أو ذاك. ونحصل بذلك على صورة ***مختلفة***، في الظاهر موضوعية، للواقع الفيزيائي.

تمكنا من عمل ذلك مرة لتمكنا منه مـرة ثانيـة وثالثـة وهكـذا... ولكـانت الجملـة الناتجـة مـن عمليات النسخ المتعددة هذه ذات اندفـاع زاوي ضخـم في اتجـاه محـدد تمامـاً، ولأمكـن عندئـذٍ تحديد هذا الاتجاه (الذي ماهو إلا الاتجاه α) بإجراء قياس جهري (ماكروسـكوبي). ولكـان في هذا تناقض مع حقيقة أن الحالة السبينية $|\alpha\rangle$ غير قابلة للقياس.

إلا أنه يمكن نسخ حالة كموميـة إذا قبلنـا بتخريـب الحالـة الأصليـة. لنتصـور، علـى سـبيل المثال، إلكترونـاً في الحالة السبينية المجهولة $|\alpha\rangle$ ونترونـاً في حالة سبينية أخرى، ولتكن $|\gamma\rangle$. لدينا كل الحق أن نبادل بين سبينيهما بحيث تصبح حالة النترون السبينية $|\alpha\rangle$ وحالة الإلكترون $|\gamma\rangle$. أما مالا نستطيع القيام به فهو أن نكرر $|\alpha\rangle$ بالنسـخ – مـا لم نكـن نعـرف مسـبقاً مـاهي $|\alpha\rangle$ فعلاً. (راجع أيضاً **Wooters and Zurek**، 1982)

لنتذكر الآن آلة "النقل الضوئي" التي جرى الحديـث عنهـا في الفصـل الأول (ص 51) لقـد كان وجودها يتوقف، من حيث المبدأ، على إمكان تجميع نسـخة كاملـة مـن جسـم إنسـان أو دماغه على كوكب بعيد. وإنه لمما يثير الفضول أن نتصور ماذا يمكن أن يحدث لو كـان إدراك الشخص يتوقف، بصورة من الصور، على بعض صفـات الحـالات الكموميـة. لـو كـان الأمـر كذلك لحالت النظرية الكمومية دون نسخ هذا "الإدراك" من دون تدمير الأصل – ولأصبحـت "مفارقة النقل الضوئي" محلولة. وسوف نبحث، في الفصلين الأخيرين من هذا الكتاب، احتمال تدخل الآثار الكمومية في عمل الدماغ.

سـبين الفوتـون

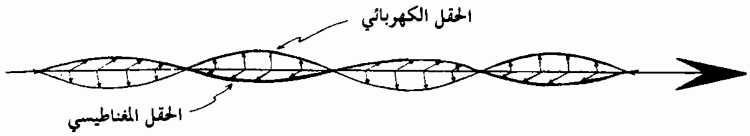
سننظر في هذه الفقرة في سبين الفوتون إنطلاقـاً مـن مفهـوم كـرة ريمـان. إذ إن للفوتونـات سبين، ولكن يتعذر أن ننسب سبينها إلى نقطة ثابتة لأن سرعتها هي دوماً سرعة الضوء. لذلك نكتفـي بذكـر محـور السـبين الـذي هـو دومـاً اتجـاه الحركـة. ويسـمى سـبين الفوتـــون عــادة "الاسـتقطاب"، **potarization** وهـو الظـاهرة الـتي يعتمـد عليهـا سـلوك النظـارات الشمسـية الاستقطابية (بولارويد). فمن المعلوم أننا إذا نظرنا من خـلال قطعتـين مـن زجـاج البولارويـد، إحداهما مقابل الأخرى، فلن يصل إلى عيننا سوى جزء من الضوء الساقط عليهما. وإذا أبقينـا إحدى قطعتي البولارويد هاتين ثابتة وجعلنا الأخرى تدور في مستويها، تغير مقدار الضوء الذي ينفذ منهما: ويكون الضوء النافذ أعظمياً في وضع معين للبولارويد الثـاني بينمـا ينعـدم بصـورة كاملة تقريباً في وضع معامد للسابق.

يمكن فهم مايحدث بأسهل سبيل استناداً إلى وجهة النظر الموجية (الكهرطيسية) التي تقـول، بحسب مكسويل، إن الضوء مجموعة حقلين مهتزين، كهربائي ومغنطيسي، ويبين الشـكل (26-6) موجة الضوء المستوية المسـتقطبة، حيـث يهـتز الحقـل الكهربـائي في مسـتو معـين – يدعـى مستوي الاستقطاب – بينما يهتز الحقـل المغنطيسـي، بانسـجام معـه، في مسـتو عمـودي علـى

مستوي الاستقطاب. ففي حالة قطعتيْ زجاج كل منهما بولارويد، لاتسمح أي منهما للضوء بالمرور إلا إذا كان مستوي استقطابه يوازي منحى بنية البولارويد نفسه (المؤلفة من اصطفاف الجزيئات). فحين يكون منحى بنية البولارويد الثاني موازياً لمنحى بنية الأول، يمر الضوء الذي نفذ من البولارويد الأول من خلال البولارويد الثاني أيضاً. أما حين تكون البنيتان متعامدتين فإن البولارويد الثاني يحجب كل الضوء النافذ من الأول. وإذا كان البولارويدان موجهين بحيث تكون بينهما الزاوية φ فلا ينفذ منهما سوى الجزء المتناسب مع

$$\cos^2\varphi$$

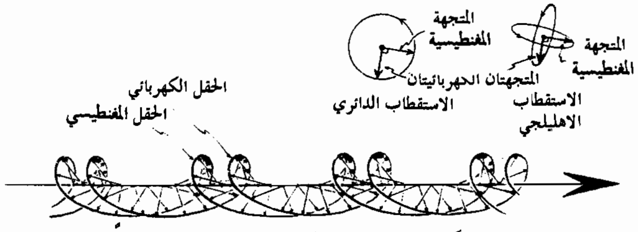
من الضوء الساقط عليهما.



الشكل 6-26: موجة كهربائية – مغنطيسية ذات استقطاب مستوي

أما في التصور الجسيمي فيجب أن نفكر كما لو أن ***لكل فوتون بمفرده*** استقطاب معين. فيعمل البولارويد الأول عمل أداة قياس تعطي الجواب "نعم" إذا كان الفوتون مستقطباً في الاتجاه المناسب، وتسمح عندئذٍ له بالمرور، والجواب "لا" إذا كان الفوتون مستقطباً في الاتجاه المعامد، ويُمتص الفوتون عندئذٍ. (في حالتنا هذه يقابل "التعامد"، بالمعنى المقصود في فضاء هلبرت، فعلاً الزاوية القائمة في الفضاء العادي). لنفترض أن الفوتون ينفذ من البولارويد الأول، فهو سيواجه السؤال نفسه لدى وصوله إلى البولارويد الثاني. فإذا كانت الزاوية بين اتجاهي البولارويدين هي φ، كما في السابق، كان احتمال نفوذ الفوتون من البولارويد الثاني، بعد عبوره الأول، مساوياً $\cos^2\varphi$.

وهنا نتساءل، ولكن مادور كرة ريمان في ذلك؟ إن دورها يأتي من أننا حين نريد الحصول على مجموعة الأعداد العقدية كاملة، الخاصة بالحالات الاستقطابية، لابد لنا من أن ندخل في حسابنا الحالات الاستقطابية الأخرى، الدائرية منها والإهليلجية. ويبيّن الشكل 6-27 معنى هذين المفهومين في النظرية الموجية الكلاسيكية. ففي حالة الاستقطاب الدائري يدور الحقل الكهربائي بدلاً من أن يهتز، كما يدور الحقل المغنطيسي مع بقائه متعامداً معه. أما في الاستقطاب الإهليلجي فهناك تركيب حركتين إحداهما دورانية والأخرى اهتزازية، وترسم نهاية المتجهة التي تمثّل الحقل الكهربائي إهليلجاً (قطعاً ناقصاً) في الفضاء. وإذا عدنا إلى الوصف الكمومي، فإن كل فوتون بمفرده يمكن أن يكون مستقطباً بإحدى هذه الأنماط المختلفة، وأن كلاً من هذه الأنماط تقابله حالة سبينية للفوتون.



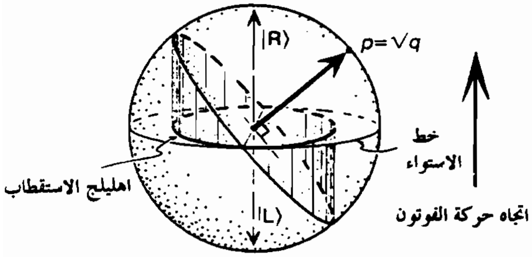
الشكل 6-27: موجة كهرطيسية مستقطبة دائرياً

(الاستقطاب الاهليلجي هو حالة وسطى بين الحالتين الحديتين الممثلتين في الشكلين 6-26و6-27).

إن مجموعة إمكانات استقطاب الفوتون هي، هنا أيضاً، ممثلة بكرة ريمان. ولكي نرى ذلك لنتخيل فوتوناً يتحرك في الاتجاه الشاقولي من الأسفل نحو الأعلى. يمثل القطب الشمالي الآن الحالة السبينية <R| "المحددة وفق قاعدة اليد اليمنى"، أي الحالة التي تكون فيها متجهة الحقل الكهربائي تدور، أثناء انتقال الفوتون، في الاتجاه المعاكس لاتجاه دوران عقارب الساعة حول الشاقول (كما ترى من الأعلى). ويمثل القطب الجنوبي الحالة السبينية <L| "المحددة وفق قاعدة اليد اليسرى". (يمكننا أن نتصور الفوتونات كطلقات بندقية تدور حول نفسها إما نحو اليمين أو نحو اليسار). أمّا الحالة السبينية العامة فهي تركيب خطي عقدي من هاتين الحالتين، وتكتب على الشكل: <R| + q|L>|، وهي تقابل النقطة المسماة q على كرة ريمان. ولتوضيح العلاقة بين q وإهليلج الاستقطاب، الذي ترسمه نهاية متجهة الحقل الكهربائي في حالة الاستقطاب الاهليلجي، يكفي أن نأخذ أولاً الجذر التربيعي للعدد q، وليكن p:

$$p = \sqrt{q}$$

ثم نعلّم على كرة ريمان النقطة p ونرسم المستوي المار من مركز الكرة والعمودي على المستقيم الواصل بين المركز والنقطة p، ثم نسقط الدائرة، التي يتقاطع وفقها هذا المستوي مع الكرة، فنحصل على إهليلج الاستقطاب (الشكل 6-28)* تمثل كرة ريمان المقابلة إلى q كل حالات الفوتون الاستقطابية، لكن p، الجذر التربيعي لِ q، هي التحقيق الفضائي لهذه الحالات.



الشكل 6-28: تتيح كرة ريمان (إنما هنا المقابلة لِ $\sqrt{q}$) تمثيل حالات الفوتون الاستقطابية أيضاً. (تدعى المتجهة التي تصل المركز بالنقطة $\sqrt{q}$ متجهة ستوكس stokes).

* إن العدد العقدي p-، شأنه شأن p تماماً، هو الجذر التربيعي للعدد q وهو يعطي إهليلج الاستقطاب ذاته. أما السبب في استخدام الجذر التربيعي فله علاقة هنا بكون الفوتون جسيم كتلته معدومة وسبينه يساوي **الواحد**، أي **مثلي** الوحدة الأساسية $\hbar/2$. أمّا الغرافيتون، وهو كمّ الثقالة الذي لم يُكشف بعد، فيجب أن يكون **سبينه 2**، أي **أربعة** أمثال الوحدة الأساسية، وسنحتاج في هذه الحالة لاستخدام الجذر من الدرجة الرابعة للعدد q.

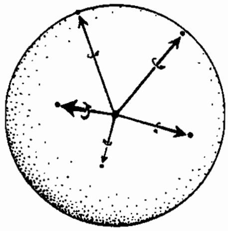
ولحساب الاحتمالات يمكننا استخدام الصيغة ذاتها $\frac{1}{2}(1+\cos\theta)$ التي استخدمناها في حالة الإلكترون على أن نضع p مكان q. لنأخذ حالة الاستقطاب **المستوي**، ولنقس أولاً استقطاب الفوتون في اتجاه معيّن ثم في اتجاه آخر يصنع مع الأول زاوية φ. يقابل هذان الاتجاهان قيمتين من قيم p تقعان على خط استواء الكرة وتحددان قوساً زاويتها المركزية هي φ. وبما أن الأعداد p هي الجذور التربيعية للأعداد q فإن الزاوية المركزية θ المقابلة للقوس التي تحددها النقاط q تساوي **ضعفي** الزاوية المركزية المقابلة للنقاط p. أي أن $\theta = 2\varphi$. وهكذا فإن احتمال الحصول على جواب "نعم" لدى إجراء القياس الثاني، بعد الحصول على "نعم" في القياس الأول (أي احتمال نفوذ الفوتون من البولارويد الثاني بعد أن نفذ من الأول)، هو $\frac{1}{2}(1+\cos2\varphi)$ ، وإن تحويلاً مثلثاتياً بسيطاً يبيّن أن هذا الاحتمال هو بالضبط $\cos^2\varphi$، كما سبق وذكرنا سابقاً.

الأجسام ذات السبين الكبير

إن فضاء الحالات المتمايزة فيزيائياً لجملة كمومية عدد متجهات القاعدة بالنسبة لها أكثر من إثنتين هو فضاء لايتمتع ببساطة كرة ريمان. لكن في حالة السبين يبقى لكرة ريمان دور هندسي هام يمكن الإفادة منه دوماً. لننظر في جسيم ***ذي كتلة***، وليكن ذرة مثلاً، سبينه $n\times\hbar/2$، ولنفترض أنه لايتحرك. يعين السبين عندئذٍ جملة كمومية ذات (n+1) حالة. (بالنسبة لجسيم ***عديم الكتلة***، أي لجسيم يسير بسرعة الضوء، مثل الفوتون، يعين السبين دوماً جملة ذات حالتين، كما شرحنا أعلاه، أمّا بالنسبة للجسيمات التي لها كتلة، فيزداد عدد الحالات مع ازدياد السبين.) فإذا قررنا أن نقيس السبين في اتجاه معين وجدنا أنه توجد n+1 نتيجة مختلفة ممكنة وذلك بحسب الجزء من السبين المتجه في ذلك الاتجاه. وتكون النتائج الممكنة لقيمة السبين في ذلك الاتجاه، مقدرة بالوحدة الأساسية $\hbar/2$، هي: n أو n-2 أو n-4 أو ... أو 2-n أو n–. فعندما تكون n=2 مثلاً تكون القيم هي 2 أو 0 أو 2-، وعندما تكون n=3 تكون القيم هي: 3 أو 1 أو 1- أو 3- وهكذا. تقابل القيم ***السالبة*** سبيناً متجهاً، عموماً، في الاتجاه ***المعاكس*** للاتجاه الذي يجرى فيه القياس. أمّا عندما يكون السبين مساوياً ½، أي عندما يكون n=1، فتقابل القيمة 1 الجواب "نعم" وتقابل القيمة 1- الجواب "لا" في وصفنا السابق.

وقد تبين، لأسباب لن أخوض في محاولة شرحها (Penrose و 1932, Majorana 1987a,)، أنه عندما يكون السبين $\frac{n}{2}\hbar$، فإن ***كل حالة سبينية تعطى (بحدود ثابتة تناسب) بوساطة مجموعة مؤلفة من n نقطة (غير مرتبة) واقعة على كرة ريمان*** – أي بوساطة n متجهة (مختلفة بصورة عامة) منطلقة من المركز (الشكل 6-29). (إن مايحدد هذه الاتجاهات هي القياسات التي يمكن إجراؤها على الجملة: فإذا قسنا السبين في أحد هذه الاتجاهات كانت النتيجة المؤكدة هي أننا لن نجده في الاتجاه المعاكس، أي أن قياس السبين يعطي إحدى القيم: n أو n-2 أو n-4 أو ... أو 2-n ولكن ليس n– بالتأكيد.) وفي الحالة الخاصة عندما

n=1، كما هو الأمر بالنسبة للإلكترون مثلاً، لاتكون هناك سوى نقطة واحدة فقط على كرة ريمان، وهي النقطة المسماة q في الوصف السابق. أمّا عندما تكون قيمة السبين أكبر فيصبح التمثيل بالضرورة أكثر تعقيداً، وهو كما شرحته الآن، إلاّ أنه، لسبب ما، غير مألوف جداً لدى الفيزيائيين.



الشكل 6-29: يمكن تمثيل الحالة العامة لسبين كبير لجسيم ذي كتلة بصورة مجموعة حالات سبينية كل منها ½ ذات اتجاهات اعتباطية.

إن في هذا الوصف ما يلفت النظر ويثير الحيرة. ذلك أن المرء غالباً مايتجه نحو الاعتقاد بأن الوصف الكمومي للذرات (أو الجسيمات الأولية، أو حتى الجزيئات)، يجب أن ينتهي حتماً - بمعنى حدي ملائم هو قيد التعريف - أو بمعنى أوضح حين ننتقل إلى الجمل الأكبر، أي الأكثر تعقيداً إلى الوصف الكلاسيكي. إلاّ أن هذا، بكل بساطة، ليس صحيحاً، وذلك لأن الحالات السبينية لجسم ذي اندفاع زاوي كبير تقابل، كما رأينا، عدداً كبيراً من النقاط منتشرة على كرة ريمان* . ويمكننا أن نتصور أن سبين الجسم مؤلف من مجموعة من السبينات المتجهة في مختلف الاتجاهات التي تحددها هذه النقاط. وإن عدداً قليلاً جداً فقط من هذه الحالات المركّبة - وبالتحديد تلك التي تكون فيها النقاط متجمعة في منطقة صغيرة على سطح الكرة (أي حين تكون معظم السبينات موجهة في الاتجاه نفسه تقريباً) - تقابل حالات الاندفاع الزاوي الفعلية للأجسام الكلاسيكية (مثل كرات المضرب). وكان بإمكاننا، من حيث المبدأ، أن نتوقع أن حالة سبينية مقابلة لعدد سبيني كبير (بالوحدات $\hbar/2$)، لكنها فيما عدا ذلك عشوائية تشبه إلى حد ما السبين الكلاسيكي (أي تشبه دوران الجسم حول نفسه). ولكن الأمور لاتسير على هذا المنوال مطلقاً. فالحالات السبينية الكمومية ذات السبين الكلي الكبير لاتشبه، بصورة عامة، في أي من الوجوه الحالات الكلاسيكية الدورانية.

فكيف يمكن إذن، والحالة هذه، إجراء تقابل بين السبين والاندفاع الزاوي الكلاسيكي؟ ففي حين أن معظم الحالات السبينية الكمومية المقابلة لعدد سبيني كبير ***لاتشبه*** بالفعل حالات حركة دوران الجسم حول نفسه الكلاسيكية، إلاّ أنها تراكيب خطية لحالات (متعامدة) ***كل***

* وبصورة أدق، فإن الاندفاع الزاوي يعطى بوساطة تركيب خطي ذي أمثال عقدية لأوضاع من هذا النوع مقابلة لأعداد متباينة من النقاط لأنه يمكن أن توجد قيم مختلفة متعددة للسبين الكلي متراكب بعضها فوق بعض في حالة الجملة المعقدة. وهذا مايجعل التمثيل الكمومي للاندفاع الزاوي أقل شبهاً، أيضاً وأيضاً، بمثيله الكلاسيكي.

واحدة منها تشبه الحالة الكلاسيكية. وبمعنى ما تعاني الجملة من إجراء "قياس" عليها و "تقفز" حالتها (باحتمال معين) إلى هذه أو تلك من الحالات الشبيهة بالكلاسيكية. وهذا الوضع مماثل للوضع المتعلق بأية خاصة أخرى من الخواص القابلة للقياس كلاسيكياً التي تتمتع بها الجملة، وليس وصفاً ينفرد فيه الاندفاع الزاوي وحده. وهذه الصفة من صفات ميكانيك الكم تبرز في كل مرة ننتقل فيها إلى "المستوى الكلاسيكي". وسيكون لدي المزيد لأقوله حول هذا الموضوع فيما بعد، ولكن يجدر بي، قبل أن أعالج مثل هذه الجملة الكمومية "الكبيرة" و "المعقدة" أن أمهد بشرح مختصر حول الطريقة الغريبة التي يعالج بها ميكانيك الكم الجمل المؤلفة من أكثر من جسيم واحد.

الجمل المتعددة الجسيمات

يتصف الوصف الكمومي لحالات الجملة المؤلفة من عدد من الجسيمات، لسوء الحظ، بالتعقيد، بل هو في الحقيقة ***بالغ التعقيد***. ولكي نتصور حالة جملة متعددة الجسيمات علينا أن نتصورها كما لو أنها انضمام كل حالات الموضع المختلفة الممكنة لكل الجسيمات. وهذا يؤدي إلى فضاء حالات ممكنة أوسع بكثير من الفضاء المقابل ***للحقل*** في النظرية الكلاسيكية. فقد سبق أن رأينا أن الحالة الكمومية ***لجسيم وحيد***، أي دالته الموجية، تتصف بالتعقيد نفسه الذي يتصف به حقل كلاسيكي. فهذا التمثيل (الذي يحتاج عدداً ***لانهائياً*** من الوسطاء لتعيينه) هو أعقد بكثير من الصورة الكلاسيكية لجسيم (التي لايحتاج تعيينها سوى عدد صغير من الوسطاء وهو ستة، إذا لم تكن له درجة حرية داخلية من نوع السبين، راجع الفصل الخامس ص 220). قد يتبادر لنا أن وصف الحالة الكمومية لجسيمين يحتاج إلى "***حقلين***"، واحد لكل جسيم، لكن الأمر ليس هكذا على الإطلاق! فوصف الحالة الكمومية لجسيمين، أو أكثر، هو أمر أكثر تعقيداً من هذا بكثير كما سنرى.

تتعين الحالة الكمومية لجسيم ***وحيد*** (دون سبين) بوساطة عدد عقدي (السعة) مرتبط بكل موضع يمكن أن يحتله الجسيم. فللجسيم سعة لأن يكون في النقطة A، وسعة لأن يكون في النقطة B، وسعة أخرى لأن يكون في النقطة C ...إلخ. لنتخيل الآن جملة مؤلفة ***من جسيمين اثنين***. يمكن أن يكون الجسيم الأول في A والثاني في B مثلاً، وهناك سعة لهذا الإمكان، لكن يمكن أن يكون الجسيم الأول في B والثاني في A، وهذا الإمكان يجب أن تكون له سعة أيضاً. أو يمكن أن يكون الأول في B والثاني في C؛ أو ربما كان كلا الجسيمين في A. يجب أن تقابل كلاً من هذه الإمكانات سعة. بمعنى أن الدالة الموجية لاتتألف من مجرد دالتيْ موضع (أي حقلين)؛ بل هي بالأحرى دالة موضعين.

ولكي نكوّن فكرة عن مدى التعقيد الناتج عن تعيين دالة موضعين بالمقارنة مع تعيين دالتيْ موضع، سوف نتخيل وضعاً يكون فيه عدد المواضع الممكنة محدوداً. لنتصور مثلاً أنه لاتوجد سوى عشرة مواضع ممكنة تقابل الحالات (المتعامدة والمستنظمة) التالية:

$$|0>, |1>, |2>, |3>, |4>, |5>, |6>, |7>, |8>, |9>.$$

تمثّل الحالة $|\psi>$ لجسيم وحيد بتركيب من النوع:

$$|\psi> = z_0|0> + z_1|1> + z_2|2> + \ldots + z_9 |9>$$

حيث تعطي المركّبات z_0 و z_1 و z_2 و ... و z_9 السعات لأن يكون الجسيم في كل من النقاط على التوالي. فما يعيِّن حالة الجسيم إذن هي الأعداد العقدية العشرة. أما في حالة ***جسيمين*** فنحتاج إلى سعة ***لكل زوج*** من المواضع، فهناك إذن:

$$10^2 = 100$$

زوجاً مختلفاً (ومرتباً) من المواضع، فنحن بحاجة إذن إلى ***مئة*** عدد عقدي. أمّا لو لم يكن لدينا سوى حالتين لجسيم واحد (أي دالتيْ موضع بدلاً من دالة موضعين) لما احتجنا إلاّ ***لعشرين*** عدداً عقدياً فقط.

يمكننا أن نرمز لهذه الأعداد المئة كما يلي:

$$z_{00}, z_{01}, z_{02},\ldots, z_{09}, z_{10}, z_{11}, z_{12},\ldots, z_{20},\ldots z_{99}$$

وأن نرمز لمتجهات القاعدة (المتعامدة والمستنظمة) المقابلة لها كما يلي(12):

$$|0> |0>, |0> |1>, |0> |2>,\ldots |0> |9>, |1> |0>,\ldots|9> |9>.$$

عندئذٍ يكون للحالة العامة $|\psi>$ لجسيمين الشكل:

$$|\psi> = z_{00} |0> |0> + z_{01} |0> |1> + \ldots + z_{99} |9> |9>$$

يحمل رمز "جداء" الحالات المعنى التالي: إذا كانت $|\alpha>$ حالة ممكنة للجسيم الأول (ليست بالضرورة حالة موضع)، وكانت $|\beta>$ حالة ممكنة للجسيم الثاني، فإن الحالة التي يكون فيها الجسيم الأول في الحالة $|\alpha>$ والثاني في الحالة $|\beta>$ تكتب بالصورة:

$$|\alpha> |\beta>$$

ويمكن كذلك تشكيل "جداء" أيّ حالتين كموميتين وإن لم تكونا حالتيْ جسيم وحيد. ونفهم دوماً الجداء $|\alpha> |\beta>$ (حيث $|\alpha>$ و $|\beta>$ ليستا بالضرورة حالتيْ جسيم وحيد) على أنه يصف الاقتران التالي: "الجملة الأولى في الحالة $|\alpha>$ والجملة الثانية في الحالة $|\beta>$". (ويبقى هذا التأويل صحيحاً بالنسبة إلى $|\alpha> |\beta> |\gamma>$..إلخ؛ أنظر مايلي). وعلى أية حال فإن الحالة ***العامة*** لجسيمين ليس لها، في الواقع، شكل "الجداء" هذا. فهي، على سبيل المثال، يمكن أن تكون بالشكل:

$$|\alpha> |\beta> + |\rho> |\sigma>$$

حيث $|\rho\rangle$ و $|\sigma\rangle$ هما حالتان ممكنتان للجسيمين الأول والثاني على الترتيب. وهذه الحالة هي، كما نرى، ***انضمام خطي***: الاقتران الأول ($|\alpha\rangle$ و $|\beta\rangle$) زائد الاقتران الثاني ($|\rho\rangle$ و $|\sigma\rangle$)، ولايمكن التعبير عنها بشكل حداء بسيط (أي بشكل اقتران حالتين). وكمثال آخر، فإن الحالة $|\alpha\rangle|\beta\rangle - i|\rho\rangle|\sigma\rangle$ هي انضمام خطي يصف حالة جملة مؤلفة من جسيمين. لنلاحظ أن ميكانيك الكم يميز بين حرف العطف "وَ" وكلمة "زائد"، على الرغم من ميل الكلام المعاصر لاستخدام كلمة "زائد" خطأ بمعنى "وَ" (كما في كتيبات شركات التأمين مثلاً). لكن ميكانيك الكم يتطلب دقة أكبر في استخدام الكلمات.

وتعالج مسألة الجسيمات الثلاثة بصورة مشابهة تماماً. فلتعيين حالة عامة لثلاثة جسيمات نحتاج، حين لاتكون هناك سوى عشرة مواضع متاحة، كما في السابق، إلى **1000** عدد عقدي! وتكون القاعدة الكاملة لحالات الجسيمات الثلاثة هذه، هي:

$$|0\rangle|0\rangle|0\rangle,\ |0\rangle|0\rangle|1\rangle,\ |0\rangle|0\rangle|2\rangle, \ldots\ |9\rangle|9\rangle|9\rangle.$$

وتكون الحالات الخاصة للجسيمات الثلاثة من الشكل:

$$|\alpha\rangle|\beta\rangle|\gamma\rangle$$

حيث $|\alpha\rangle$ و $|\beta\rangle$ و $|\gamma\rangle$ ليست بالضرورة حالات موضع، أما الشكل العام لحالة الجسيمات الثلاثة فيتم الحصول عليه بضم عدة حالات من هذا النوع. وبالنسبة لأربعة جسيمات أو أكثر تتبع طريقة مماثلة.

لقد جرى الحديث حتى الآن حول الجسيمات ***المتمايزة distinguishable*** (أي التي يمكن التمييز فيما بينها) فكنا ننظر إلى: "الجسيم الأول" و "الجسيم الثاني" و "الثالث" ..إلخ على أنها من أنواع ***مختلفة***. لكن لميكانيك الكم الخاصة المدهشة التالية: إن القواعد السابقة ليست صحيحة بالنسبة للجسيمات ***المتماثلة identical***.† والواقع أن قواعد ميكانيك الكم هي أن الجسيمات من النوع نفسه يجب أن تكون متماثلة بالضبط، وليست، فحسب، متماثلة مثلاً إلى حد كبير. وهذا يطبق على الإلكترونات التي هي كلها متماثلة، كما يطبق على الفوتونات التي هي كلها متماثلة أيضاً. لكن الإلكترونات متماثلة كلها فيما بينها بطريقة تختلف عن الطريقة التي تماثل بها الفوتونات أحدها الآخر. ويكمن الاختلاف في أن الإلكترونات هي فرميونات بينما الفوتونات هي بوزونات. ويجب أن يعامل هذان الصنفان العامان من الجسيمات بطريقتين مختلفتين.

---

† إن الجسيمات غير المتماثلة (التي من أنواع مختلفة) هي جسيمات متمايزة دوماً. أمّا الجسيمات المتماثلة (التي من النوع نفسه) فتعامل في الميكانيك الكلاسيكي على أنها متمايزة أيضاً، بينما تعامل في ميكانيك الكم على أنها لامتمايزة **indistinguishable** (وفقاً لما يسمى مبدأ لاتمايز الجسيمات المتماثلة).

ولكن قبل أن أربك القارئ بمثل هـذه المصطلحـات اللفظيـة، أرى أن أشـرح كيـف ينبغـي وصف حالات الفرميونات وحالات البوزونات. إن القاعدة هي التاليـة: إذا كـانت $|\psi\rangle$ حالـة يدخل فيها عدد من الفرميونات من نوع معين، فإن تبادل اثنين منها فيمـا بينهمـا يجعـل إشـارة $|\psi\rangle$ تتغير، أي يؤدي إلى التحول:

$$|\psi\rangle \rightarrow -|\psi\rangle$$

أما إذا كانت $|\psi\rangle$ حالة تتضمن عدداً من البوزونات من نوع معيّن، فإن تبادل اثنين منها فيمـا بينهما يُبقى $|\psi\rangle$ على حالها:

$$|\psi\rangle \rightarrow |\psi\rangle$$

إن إحدى نتائج هذه القاعدة هو أنه ***لايمكن لأي فرميونين أن يكونا في الحالة نفسها***. لأنـه لو حدث وكانا في الحالة نفسها لما أثّر تبادلهما فيما بينهمـا في الحالـة الكليـة ولكـان لدينـا إذن $|\psi\rangle = -|\psi\rangle$ أي $0 = |\psi\rangle$. وقد سبق أن رأينا أن 0 لايمثـل أيـة حالـة كموميـة. تعـرف هـذه الخاصة ***باسم مبدأ الاستبعاد لباولي***[(13)] (Pauli's exclusion pinciple). أمّـا نتائجهـا بالنسـبة لبنية المادة فذات أهمية عظيمـة. وبـالفعل فـإن كـل المكونـات الرئيسـية للمـادة (الإلكترونـات والبروتونات والنترونات) هي فرميونات. ولولا مبدأ الاستبعاد لانهارت المادة على نفسها!

لنعد إلى حالـة المواضـع العشـرة الممكنـة، ولنفـترض أن لدينـا حالـة مؤلفـة مـن فرميونيـن متماثليـن. إن الحالة $|0\rangle|0\rangle$ مستثناة بسبب مبدأ باولي (لأن هذه الحالة تتحول إلى نفسها بـدلاً من أن تغير إشارتها لدى تبادل الجسيمين) وكذلك فإن الحالـة $|0\rangle|1\rangle$ وهـي بهـذه الصـورة، لاتصلح لأنها هي أيضاً لاتغير إشارتها لدى تبـادل الجسـيمين. لكـن يمكـن معالجـة هـذا الأمـر بسهولة، وذلك إذا أخذنا، بدلاً منها، التركيب:

$$|0\rangle|1\rangle - |1\rangle|0\rangle$$

(أهملـت هنـا وضـع العـامل المشـترك $1/\sqrt{2}$ الضـروري للاسـتنظام). إن هـذه الحالـة تغـير إشارتها كما ينبغي لدى تبادل الجسيمين، لكن الحـالتين $|0\rangle|1\rangle$ و $|1\rangle|0\rangle$ لم تعـودا حـالتين مستقلتين، وبدلاً منهما لدينا الآن حالة واحدة فقط. فإذا أجرينا حساب مجمـل عـدد الحـالات من هذا النوع وجدنا† :

$$\tfrac{1}{2}(10 \times 9) = 45$$

أي حالة واحدة لكل زوج غير مرتـب مـن الحـالات العشـر المتمـايزة: $|0\rangle$ و $|1\rangle$ و ...9 $|9\rangle$. وهكذا يحتاج تعيين حالة فرميونين إلى معرفة 45 عدداً عقدياً. وبالنسـبة لثلاثـة فرميونـات تـلزم ثلاثة مواضع مختلفة، ولذلك يكون لحالات القاعدة الشكل:

$$\dagger\ \frac{N!}{(N-n)!n!} = \frac{10!}{8! \times 2!} = \frac{10 \times 9}{2} = 45$$

$$|0\rangle|1\rangle|2\rangle + |1\rangle|2\rangle|0\rangle + |2\rangle|0\rangle|1\rangle - |0\rangle|2\rangle|1\rangle - |2\rangle|1\rangle|0\rangle - |1\rangle|0\rangle|2\rangle$$

وعددها الإجمالي هو:

$$\frac{1}{6}(10 \times 9 \times 8) = 120$$

120 حالة من مثل هذه الحالات، ويحتاج تعيين حالة ثلاثة فرميونات إذن إلى 120 عدداً عقدياً.
وبالنسبة لجمل مؤلفة من عدد أكبر من الفرميونات يكون الوضع مشابهاً.
أمّا بالنسبة لزوج من البوزونات المتماثلة فإن حالات القاعدة المستقلة على نوعين، فهي إمّا حالات من النوع:

$$|0\rangle|1\rangle + |1\rangle|0\rangle$$

أو من النوع:

$$|0\rangle|0\rangle$$

(وهي الآن مسموحة). وهذا يؤدي إلى إمكانات عددها:

$$½\,(11 \times 10) = 55$$

أي أننا نحتاج إلى 55 عدداً عقدياً لتعيين حالة البوزونين. وبالنسبة لثلاثة بوزونات هناك حالات قاعدة من ثلاثة أنواع مختلفة، ويحتاج تعيين حالة ثلاثة بوزونات إلى أعداد عقدية عدها:

$$\frac{1}{6}(12 \times 11 \times 10) = 220$$

وهكذا دواليك.

لقد اقتصرت هنا، بطبيعة الحال، على وضع مبسَّط جداً (عشرة مواضع ممكنة لجسيم واحد) وذلك لكي أركّز على الأفكار الأساسية. أمّا الوصف الأكثر قرباً من الواقع فيتطلب عدداً لانهائياً من حالات الموضع، لكن الطريقة تبقى في الأساس نفسها. ويضيف السبين تعقيداً إضافياً. فبالنسبة لجسيم سبينه ½ (فهو إذن بالضرورة فرميون) ترفق كل حالة موضع بحالتيْ سبين ممكنتين سوف نرمز لهما بالرمزين "↑" (السبين للأعلى) و "↓" (السبين للأسفل). عندئذٍ تكون لدينا، في حالتنا البسيطة المتعلقة بجسيم واحد وعشرة مواضع ممكنة، عشرون حالة قاعدة بدلاً من عشر:

$$|0\uparrow\rangle, |0\downarrow\rangle, |1\uparrow\rangle, |1\downarrow\rangle, |2\uparrow\rangle, |2\downarrow\rangle, \dots |9\uparrow\rangle, |9\downarrow\rangle.$$

وفيما عدا ذلك فإن المعالجة هي كما في السابق بالضبط. ومن أجل فرميونين يكون عدد الأعداد العقدية التي نحتاج إليها لوصف حالتها هو:

$$½(20\times19)=190$$

ويصبح هذا العدد، بالنسبة لثلاثة فرميونات هو:

$$\frac{1}{6}(20 \times 19 \times 18) = 1140$$

وهكذا ...

لقد أشرت في الفصل الأول إلى أنه، طبقاً للنظرية الحديثة، لايحدث شيء على الإطلاق فيما لو استبدل بجسيم من جسم شخص ما جسيم مماثل من إحدى آجرات بيته مثلاً، فلو كان هذا الجسيم المستبدل بوزوناً لما تأثرت الحالة $|\psi\rangle$ كما رأينا. أما لو كان فرميوناً لحلت مكان الحالة $|\psi\rangle$ الحالة المعاكسة لها بالإشارة $-|\psi\rangle$ والمماثلة لها فيزيائياً. (يمكننا علاج تغير الإشارة، فيما لو شعرنا بالحاجة لذلك، بتدوير أحد الجسيمين دورة كاملة، 360 درجة، لدى إجراء المبادلة، وذلك لأن حالة الفرميون، كما رأينا، تغير إشارتها لدى مثل هذا الدوران بينما لاتتأثر حالة البوزون بذلك). وتأتينا النظرية الحديثة (التي طورت نحو عام 1926) بالفعل بمعلومات أساسية حول الهوية الفردية للأجزاء الصغيرة من المادة. فلا يستطيع المرء أن يشير بصورة صحيحة جازمة إلى "هذا الإلكترون المعين" أو "ذاك الفوتون المفرد بالذات". إن قولنا أن "الإلكترون الأول موجود هنا والثاني هناك" هو كقولنا إن حالة الجملة هي من الشكل $|1\rangle|0\rangle$، وهذا شكل غير ممكن، كما رأينا، لحالة فرميونين. ولكنه يحق لنا، بالمقابل، أن نؤكد "وجود إلكترونين أحدهما هنا والآخر هناك". كما يحق لنا تماماً الحديث عن مجموعة مجمل الإلكترونات أو مجمل البروتونات أو مجمل الفوتونات (على الرغم من أن هذا الأسلوب يتجاهل ***التأثيرات المتبادلة*** بين مختلف أنواع الجسيمات). إن تصور إلكترونات منفردة، أو بروتونات منفردة، أو فوتونات منفردة، يعطينا صورة تقريبية للواقع تكفي، عموماً، لمعظم الأغراض، لكنها لاتصلح في أحوال أخرى كالناقلية (الموصلية) الفائقة والميوعة الفائقة وسلوك الليزر، وامور اخرى كثيرة.

إن صورة العالَم الفيزيائي التي يقدمها لنا ميكانيك الكم تختلف اختلافاً جذرياً عن الصورة المعتادة الناتجة من الفيزياء الكلاسيكية، ولكن مهلاً فنحن لم نرَ بعد سوى القليل من غرابة العالم الكمومي!

"مفارقة" أينشتين وبودولسكي وروزن

لقد قامت أفكار أينشتين، كما سبق وذكرت في بداية هذا الفصل، بدور أساسي في تطور النظرية الكمومية. ونذكر أنه هو الذي كان أول من اقترح – منذ عام 1905– مفهوم "الفوتون" (كمّ الحقل الكهرطيسي) والذي نشأت منه فكرة المثنوية موجة ــ جسيم. (ويعود لأينشتين كذلك، جزئياً على الأقل، الفضل في مفهوم "البوزون"، وفي أفكار أساسية عديدة أخرى في النظرية الكمومية.) إلاّ أن أينشتين لم يستطع أبداً قبول النظرية التي تطورت فيما بعد بدءاً من هذه الأفكار، وكان دوماً ينظر إلى هذه النظرية على أنها ليست سوى مرحلة مؤقتة بانتظار التوصل إلى وصف حقيقي للعالَم الفيزيائي. فقد كان مقته للسمة الاحتمالية لهذه النظرية معروفاً جيداً، وهو مايعبر عنه ماجاء في جوابه على إحدى رسائل ماكس بورن عام 1926 (وهو مذكور في Pias 1928, صفحة 443): "إن ميكانيك الكم يثير إعجابي حقاً، لكن

صوتاً داخلياً يقول لي أنه ليس بعد الشيء الصحيح. ومع أن النظرية مثمرة وتفسر أشياء كثيرة لكنها لاتكاد تقربنا من سر الإله. وإنني، على أية حال، مقتنع أن الإله لايلعب النرد". ويبدو، على كل حال، أن الشيء الذي كان يقض مضجع أينشتين، أكثر من هذه اللاحتمية الفيزيائية، هو النقص ***الظاهري في الموضوعية*** في الطريقة التي يجب أن توصف بها النظرية الكمومية. لقد بذلت جهدي، أثناء عرضي كله حتى الآن لهذه النظرية، أن أؤكد أن وصف العالم، كما تقدمه النظرية، هو وصف موضوعي، على الرغم من أنه، في بعض الأحيان، غريب ومناف للبديهة. ومن ناحية أخرى فقد نظر بور إلى الحالة الكمومية لجملة ما (فيما بين قياسين) على أنها ليست ذات واقع فيزيائي فعلي، وأنها لاتمثل سوى ملخص "معرفتنا" المتعلقة بهذه الجملة. وفي هذه الحال يحق لنا أن نتساءل أمن الممكن أن تكون لدى راصدين مختلفين "معارف" مختلفة عن الجملة المدروسة؟ فإن كان الأمر كذلك تبيّن أن الدالة الموجية "غير موضوعية" في أساسها، وأنها كلها ليست إلاّ "في ذهن الفيزيائي". ولكن بما أنه لايمكن لصورة العالَم الفيزيائية الدقيقة والرائعة التي بذلنا جهوداً كبيرة لتكوينها على مدى قرون عديدة أن تتبخر وتزول نهائياً، فقد اضطر بور أن يقول أن للعالم في ***المستوى الكلاسيكي*** واقعية موضوعية بالفعل بينما تفتقر حالات الجملة في ***المستوى الكمومي*** إلى هذه الواقعية.

لقد تعارض هذا النوع من تمثيل العالم بشدة مع أينشتين الذي كان يعتقد بوجود عالم فيزيائي موضوعي حتى في أدق مستويات الظواهر الكمومية. ولقد حاول (ولكن دون طائل) في مناظراته العديدة مع بور أن يبرهن على وجود تناقضات داخلية في طبيعة التمثيل الكمومي نفسه للأشياء، وأنه يجب أن تكون هناك، في مستوى أعمق من مستوى النظرية الكمومية، بنية من المحتمل أن تكون أقرب إلى الصورة التي تزودنا بها الفيزياء الكلاسيكية. فربما كان في أساس السلوك الاحتمالي للجمل الكمومية تأثير من نوع إحصائي لمكونات أصغر أو "أجزاء" من الجملة ليست لدينا معرفة مباشرة بها. وقد طوَّر أتباع أينشتين، وبصورة خاصة دافيد بوم، وجهة النظر هذه المعروفة باسم "المتحولات الخفية" **hidden variables** والتي تقول بوجود واقع محدد تماماً لكن وسطاءه ليست في متناولنا مباشرة. وهكذا تفسَّر الصفة الاحتمالية لميكانيك الكم بسبب عدم إمكان معرفة هذه الوسطاء قبل إجراء أي قياس.

ولكن هل تنسجم نظرية المتحولات الخفية هذه مع كل الحقائق التجريبية في الفيزياء الكمومية؟ يبدو أن الجواب هو نعم، إنما بشرط أن تكون النظرية، بطريقة جذرية ومبدئية، ***لامحلية non- local*** ، بمعنى أن الوسطاء الخفية يجب ان تكون قادرة على التأثير، بصورة آنية، في أجزاء من الجملة مفصولة إحداها عن الأخرى بمسافات كبيرة بقدر مانشاء! وهذا هو بالضبط ما لم يقبل به أينشتين، وخاصة بسبب المصاعب التي تسببها وجهة النظر هذه لدى مقارنتها بالنظرية النسبية الخاصة، وسوف أعود لهذا فيما بعد. أما الآن فلنقل أن أكثر نظريات المتحولات الخفية نجاحاً هي تلك المعروفة باسم نموذج دوبروي – بوم **de Broglie- Bohm**

(دوبروي 1956 وبوم 1952). ولن أبحث في مثل هذه النماذج هنا لأن غرضي في هذا الفصل هو مجرد إعطاء فكرة عامة عن النظرية الكمومية السائدة (القياسية) وليس عن الاقتراحات البديلة المختلفة. فإذا كان مانرغب به هو الموضوعية الفيزيائية فإن النظرية القياسية تكفي تماماً بشرط أن نكون مستعدين للتخلي عن فكرة الحتمية. إذ يكفي عندئذٍ النظر إلى متجهة الحالة على أنها هي "الواقع" - وهي تتطور بصورة عامة وفق الإجراء الحتمي السلس U، لكنها تتعرض من حين لآخر "لقفزات" غريبة وفق الإجراء R كلما تم تضخيم أثر ما إلى المستوى الكلاسيكي - وعلى أية حال فإن المشكلة المتعلقة بلامحلية النظرية والصعوبات المتعلقة بالنظرية النسبية لاتختفي، وهذا هو ماسنتعرض للحديث عنه الآن.

لنفترض أن لدينا جملة فيزيائية مؤلفة من جملتين جزئيتين A و B، يمكن أن تكونا، على سبيل المثال، جسيمين مختلفين. ولنفترض أن للجسيم A حالتين ممكنتين (متعامدتين) هما $|\alpha\rangle$ و $|\rho\rangle$، وأن للجسيم B الإمكانين $|\beta\rangle$ أو $|\sigma\rangle$. وكما رأينا سابقاً فإن الحالة العامة المركَّبة لهذين الجسيمين لايمكن أن تكون جداء حالة الجسيم A "وَ" حالة الجسيم B، وإنما ينبغي أن تكون تركيباً خطياً ("زائد") لمثل هذه الجداءات (ويقال عندئذٍ أن A و B ***مرتبطان*** correlated). لنأخذ حالة الجملة على الشكل:

$$|\alpha\rangle|\beta\rangle + |\rho\rangle|\sigma\rangle$$

ولنجرِ قياساً من النوع نعم/لا على A، قياساً يقابل بين "نعم" و $|\alpha\rangle$ وبين "لا" و $|\rho\rangle$. فماذا يحدث للجسيم B؟ لو كانت نتيجة القياس على A هي "نعم" لوجب أن تكون الحالة بعد القياس هي:

$$|\alpha\rangle|\beta\rangle$$

بينما لو كانت النتيجة "لا"، لكانت حالة الجملة هي:

$$|\rho\rangle|\sigma\rangle$$

أي أن القياس الذي أجري على A سبب قفزة لحالة B، فجعلها تقفز إمّا إلى $|\beta\rangle$ في حال كون نتيجة القياس على A "نعم"، أو إلى $|\sigma\rangle$ في الحالة الأخرى. وهذا كله دون أن نتطلب أن يكون الجسيم B في موضع قريب من A، إذ يمكن أن يكون الجسيمان بعيدين أحدهما عن الآخر مسافة سنوات ضوئية! فهذا لايمنع B أن يقفز في اللحظة ذاتها التي يجرى فيها القياس على A.

من حق القارئ أن يقول، ولكن مهلاً، فما معنى كل هذا "القفز"؟ ولِمَ لايمكن أن تكون الأمور تجري على النحو البسيط التالي؟ لنتخيل صندوقاً نعرف أنه يحوي كرتين إحداهما بيضاء والأخرى سوداء. ولنفترض أننا أخرجنا الكرتين من الصندوق وأننا وضعنا كلاً منهما في إحدى زاويتي الغرفة المتقابلتين دون النظر إلى أي منهما. فإذا مانظرنا بعد ذلك إلى إحدى الكرتين ووجدنا أنها بيضاء (وهو مايكافئ الحالة $|\alpha\rangle$ المذكورة أعلاه)، لما أمكن أن تكون الكرة الأخرى طبعاً إلاّ سوداء (وهذا يكافئ الحالة $|\beta\rangle$). أمّا إذا وجدنا أن الكرة الأولى

ســوداء ("|ρ>") فستقفز حالة الكرة الثانية، غير المؤكدة حتى هــذه اللحظـة، بلمـح البصـر إلى "بيضاء بالتأكيد" ("|σ>"). وسيصر القارئ أنه مامن أحـد بكـامل عقلـه يمكـن أن يعـزو التغـير الفجائي في حالة الكرة الثانية من "غير مؤكدة" إلى "سوداء بالتأكيد" أو "بيضــاء بالتـأكيد" إلى تأثير ما غامض "لامحلي" ينتقل آنياً من الكرة الأولى إلى الثانية في اللحظة ذاتها الـتي ننظـر فيهـا إلى الكرة الأولى.

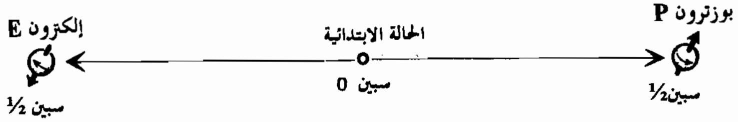
لكن الطبيعة تفعل أشياء أغـرب مـن هـذا بكثـير. إن بإمكاننـا أن نتخيـل، بالنسـبة للمثـال السابق، أن ***الجملة*** كانت "تعرف" حتى قبل أن نجري القياس على A، أن حالة B، مثـلاً، هـي |β> وأن حالة A هي |α> (أو أن حالة B هـي |σ> وحالـة A هـي |ρ>)، بينمـا ***المجرب*** نفسـه لايعرف شيئاً من هذا. فحين يجد المجرب أن A في الحالة |α> ***يستنتج*** أن B في الحالـة |β>. إن تصور الأمور تجري على هذا النحو مــاهو إلا تبـني وجهـة النظـر الكلاسـيكية - وهـو ماتفعلـه النظريات المحلية ذات المتحولات الخفية - ولامكان هنـا لأي "قفـز" ***فيزيائي*** (فـالقفز في عقـل المجرب فحسب!). وطبقاً لوجهة النظر هذه "يعرف" كل جزء من أجـزاء الجملـة مسـبقاً نتـائج أي قياس يمكن أن يجرى عليها، ولاتنشأ الاحتمالات إلاّ بسبب أن المجـرب نفسـه لايملـك هـذه المعرفة. لكن يتبين، وهذا أمر في غاية الأهمية، أن وجهة النظر هذه غـير صالحـة لتفسـير ظهـور كل الاحتمالات، التي يبدو أنها لامحلية، في النظرية الكمومية.

ولكي يزداد اقتناعنا سوف ننظر في وضع يشبه السابق إنّما "نؤخر" فيه ***اختيار القياس*** الـذي سيجرى على الجملة A، أي أن قرار إجراء قياس على A لايتخذ إلاّ بعد أن يكـون A و B قـد انفصلا عن بعضهما لمسافة كبيرة. ويبدو عندئذٍ أن سلوك B يتأثر آنياً بهـذا الاختيـار بـالذات! ويعودالفضل في هذا النوع من التجـارب التخيليـة المنطويـة ظاهريـاً علـى مفارقـة إلى أينشـتاين وبودولسكس وروزن (في عام 1935)، وهي تسمى اختصـاراً "مفارقـة EPR"† .وسـوف أقـدم شكلاً مختلفاً عن الأصل من هذه التجربة تخيله بوم (1951). هناك نظرية شهيرة لجون بل (أنظر 1987, Bell و 1986 Rae, و 1986, Squiers) ينتج منها أنه مامن وصـف محلـي "واقعـي" (أي من "النمط الكلاسيكي" أو المتحولات الخفية) يمكـن أن يتنبـأ بصـورة صحيحـة بالاحتمـالات الكمومية.

لنتخيل جسيمين سـبين كل منهما ½ - وليكونا ***إلكتروناً وبوزتروناً*** (أي إلكترون مضاد) - ينتجان من تفكك جسيم واحد سـبينه 0 في نقطة نتخذها مبدأ، وأن الجسيمين يبتعـدان عـن المبدأ في اتجاهين متعاكسين (الشكل 6-30). يتطلب انحفاظ الاندفاع الزاوي أن يكـون مجمـوع سبيني الإلكترون والبوزترون مساوياً الصفر، لأن قيمة الاندفاع الـزاوي للجسـيم الأصلي قبـل تفككه كانت كذلك. ينتج من هذا أنه بعد قياس سبين الإلكترون في اتجاه ما، مهما كان هـذا

† EPR هي الأحرف الأولى من أسماء أصحابها: أينشتين Einstein وبودولسكي Podolsky وروزِن Rosen.

الاتجاه، يجب أن يكون سبين البوزترون بالضرورة متجهاً في الاتجاه ***المعاكس*** لسبين الإلكترون. ويبدو أن ***اختيار*** القياس على أحد الجسيمين في هذا الاتجاه أو ذاك هو الذي يحدد، ***وبصورة آنية***، اتجاه سبين الجسيم الآخر حتى ولو كان الجسيمان على بعد أميال، أو حتى سنين ضوئية، أحدهما عن الآخر!



الشكل 6-30: يتفكك جسيم سبينه صفر إلى جسيمين سبين كل منهما ½: إلكترون E وبوزترون P. يبدو أن قياس سبين أحد الجسيمين يحدد، *وبصورة آنية*، الحالة السبينية للجسيم الآخر.

دعونا نرى كيف توصلنا شكلية ميكانيك الكم إلى هذا الاستنتاج. سوف نمثّل حالة الجسيمين المركّبة المقابلة لقيمة معدومة للاندفاع الزاوي بمتجهة الحالة $|Q\rangle$، فيكون:

$$|Q\rangle = |E\uparrow\rangle |P\downarrow\rangle - |E\downarrow\rangle |P\uparrow\rangle,$$

حيث تدل E على الإلكترون و P على البوزترون، وحيث مثلنا حالة الجملة في قاعدة الحالات "للأعلى" و "للأسفل" لاتجاهي السبين. ونرى أن حالة مجموعة الجسيمين هي تركيب خطي من حالة "الإلكترون وسبينه للأعلى" و "البوزترون وسبينه للأسفل" وحالة "الإلكترون وسبينه للأسفل" و "البوزترون وسبينه للأعلى" فإذا وجدنا، بنتيجة قياس سبين الإلكترون في الاتجاه الشاقولي أعلى/أسفل، أنه في الاتجاه للأعلى قفزت حالة الجملة الكلية إلى الحالة $|E\uparrow\rangle |P\downarrow\rangle$ بحيث أن سبين البوزترون يتجه حتماً إلى الأسفل. وبالعكس إذا بيّن قياس سبين الإلكترون أنه يتجه للأسفل، فإن حالة الجملة تقفز إلى الحالة $|E\downarrow\rangle |P\uparrow\rangle$ ويكون سبين البوزترون بالضرورة للأعلى.

لنفترض الآن أننا اخترنا إجراء القياس في اتجاهين متعاكسين آخرين كاتجاهي اليمين واليسار مثلاً، فمن المعلوم أن:

$$|E\rightarrow\rangle = |E\uparrow\rangle + |E\downarrow\rangle \quad , \quad |P\rightarrow\rangle = |P\uparrow\rangle + |P\downarrow\rangle$$

و

$$|E\leftarrow\rangle = |E\uparrow\rangle - |E\downarrow\rangle \quad , \quad |P\leftarrow\rangle = |P\uparrow\rangle - |P\downarrow\rangle$$

وأننا نجد إذن (كما يمكن للقارئ أن يتحقق من ذلك بنفسه!):

$$\begin{aligned}
&|E\rightarrow\rangle |P\leftarrow\rangle - |E\leftarrow\rangle |P\rightarrow\rangle \\
&= (|E\uparrow\rangle + |E\downarrow\rangle)(|P\uparrow\rangle - |P\downarrow\rangle) - (|E\uparrow\rangle - |E\downarrow\rangle)(|P\uparrow\rangle + |P\downarrow\rangle) \\
&= (|E\uparrow\rangle |P\uparrow\rangle + |E\downarrow\rangle |P\uparrow\rangle + |E\uparrow\rangle |P\downarrow\rangle - |E\downarrow\rangle |P\downarrow\rangle \\
&- |E\uparrow\rangle |P\uparrow\rangle + |E\downarrow\rangle |P\uparrow\rangle + |E\uparrow\rangle |P\downarrow\rangle + |E\downarrow\rangle |P\downarrow\rangle \\
&= 2(|E\downarrow\rangle |P\uparrow\rangle - |E\uparrow\rangle |P\downarrow\rangle) = -2(E\uparrow\rangle |P\downarrow\rangle - (E\downarrow\rangle |P\uparrow\rangle) \\
&= -2|Q\rangle
\end{aligned}$$

وهذه إن هي إلا الحالة نفسها التي بدأنا منها (بغض النظر عن معامل 2- لاأهمية له). يمكن إذن اعتبار الحالة الأصلية أنها تركيب خطـي مـن حالـة "الإلكـترون ذي السـبين المتجـه إلى اليمـين والبوزترون ذي السبين المتجــه إلى اليســار" وحالـة "الإلكـترون ذي السـبين المتجـه إلى اليسـار والبوزترون ذي السبين المتجه إلى اليمين". إن التعبير عن الحالة الأصلية بهذا الشكل مفيد حـين نختار قياس سبين الإلكترون في الاتجاه يمين/يسار بدلاً من الاتجاه أعلى/أسفل. فـإذا بـين القيـاس أن سبين الإلكترون يتجه بالفعل إلى اليمين قفزت حالة الجملة إلى الحالـة $|E\rightarrow\rangle|P\leftarrow\rangle$ وكـان اتجاه سبين البوزترون نحو اليسار. وبالعكس إذا بين القياس أن سبين الإلكترون يتجه إلى اليسـار ***قفزت حالة الجملة*** إلى الحالة $|E\leftarrow\rangle|P\rightarrow\rangle$ بحيث يكون سـبين البوزتـرون متجهـاً إلى اليمـين. ولو أننا اخترنـا أن نقيـس سـبين الإلكـترون في أي إتجـاه آخـر لتكـررت القصـة نفسـها تمامـاً، ولقفزت حالة سبين البوزترون آنياً إلى الحالة التي يكون فيها سبينه في هـذا الاتجـاه نفسـه أو في الاتجاه المعاكس له وذلك حسبما تكون نتيجة قياس سبين الإلكترون.

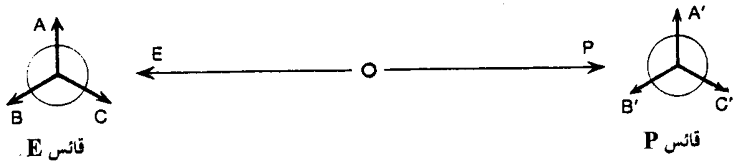
ماالسبب ياترى في أنه لايمكـن معاملـة هذيـن الجسـيمين (الإلكـترون والبوزتـرون) بطريقـة مشابهة لتلك التي عالجنا بها الكرتين السوداء والبيضاء المأخوذتين من صندوق في مثالنا السابق؟ سوف نتناول الأمر في الحالة العامة تماماً، فبدلاً من كرتين بيضـاء وسـوداء لتكـن لدينـا جملتـان ميكانيكيتان (آلتان)، سندعوهما E و P، كانتا متحدتين في البداية ثم راحتا تبتعـدان إحداهمـا عن الأخرى في اتجاهين متعاكسين. ولنتخيل أن كلاً من E و P قادرة على الإجابة إما بِـ "نعم" وإما بِـ "لا" لدى قياس السبين في أي اتجاه كان. علـى أن تكـون الإجابـة، بالنسـبة لكـل اتجـاه نختاره، إمّا إجابة محددة بـالضبط، أو إجابـة ذات طبيعـة إحتماليـة، والاحتمـال في هـذه الحالـة تحدده الجملة الميكانيكية نفسها. وإضافة لذلك سنفترض أن كلاً من الآلتين E و P تسلك، بعد انفصالهما، ***سلوكاً مستقلاً تماماً عن الأخرى***.

لنفترض بعد ذلك أن لدينا في كل من طرفي الاستقامة EP "قائس سـبين"، يقيـس أحدهمـا سبين E ويقيـس الآخـر سـبين P. ولنفـترض أنـه ليـس لكـل مـن قائسـي السـبين سـوى ثلاثـة مؤشرات، مقابلة لثلاثة من اتجاهات السبين، هي A و B و C بالنسبة لقائس سـبين E (الـذي سندعوه فيما يلي اختصاراً القائس E) و A′ و B′ و C′ بالنسـبة للقائس P. ولنفترض أيضـاً أن الاتجاهـات A′ و B′ و C′ توازي A و B و C على الترتيـب، وأن A و B و C، إضافة لذلـك، تقع كلها في مستوي واحد وتشكل فيما بينها زوايا متساوية، أي زاويـة 120° بـين كـل اثنـين متجاورين منها، (الشكل 6-31). لنتخيل الآن أننا كررنا التجربة مـرّات عديـدة، وأننـا كنّـا في كل مرة نغير وضعية القياس لكـل مـن القائسـين. سـوف نجـد أن القـائس E يسـجل في بعـض الأحيان "نعم" (مما يشير إلى أن السبين هو في الاتجاه نفســه الـذي يجـرى فيـه القيـاس: أي فــي أحـد الاتجاهـات A أو B أو C)، ويسـجّل في أحيـان أخرى "لا" (ممّـا يشـير إلى أن السـبين في

الاتجاه المعاكس). وبصورة مشابهة سوف يسجّل القائس P أحياناً "نعم" واحياناً أخرى "لا". لنلاحظ مباشرة أن الاحتمالات ***الكمومية*** يجب أن تتمتع بالخاصتين التاليتين:

(1) إذا أُجري القياس في الاتجاه ***نفسه*** في الجانبين (أي A و A′ أو B و B′ ..إلخ) كانت نتائج القائسين ***متعاكسة*** دوماً (أي أن القائس E يُسجّل "نعم" في كل مرة يسجّل فيها القائس P "لا"، وبالعكس).

(2) إذا جُعلت وضعيات اتجاهات القياس ***اعتباطية***، وبصورة تكون فيها مستقلة في أحد الجانبين عنها في الآخر، ***كان احتمال اتفاق نتائج القائسين مساوياً لاحتمال تعاكسها*** .



الشكل 6-31: صورة ميرمين Mermin المبسطة لمفارقة EPR ونظرية بِل تبين وجود تناقض بين وجهة النظر الواقعية المحلية ونتائج النظرية الكمومية. هنا يوضع كل من القائس E والقائس P، بصورة مستقلة، في ثلاث وضعيات للاتجاهات التي تقاس وفقها سبينات الجسيمات في كل منهما.

يمكننا أن نرى بسهولة أن هاتين الخاصتين تنتجان مباشرة من قواعد الاحتمالات الكمومية التي تمّ شرحها فيما سبق. لنفترض أن القائس E هو الذي يعمل أولاً: سيجد القائس P عندئذٍ جسيماً سبينه معاكس لذلك الذي قاسه القائس E. ومن هنا تنتج الخاصة (1) مباشرة. أمّا الخاصة (2) فتنتج من أنه حين يكون بين اتجاهي القياس في الجانبين زاوية 120°، إذا أعطى القائس E النتيجة "نعم" كان بين اتجاه السبين لدى P واتجاه القياس زاوية 60°، وإذا كانت النتيجة "لا" كانت الزاوية بين اتجاه السبين واتجاه القياس في P مساوية 120°. فاحتمال اتفاق القياسين هو إذن $\frac{1}{2}(1+\cos 60°) = \frac{3}{4}$ واحتمال تعاكسهما هو $\frac{1}{2}(1+\cos 120°) = \frac{1}{4}$. وهكذا يكون الاحتمال الوسطي لأن يعطي p النتيجة "نعم"، من أجل وضعياته الثلاث، إذا كانت نتيجة قياس E هي "نعم" هو: $\frac{1}{2} = (\frac{3}{4} + \frac{3}{4} + 0)\frac{1}{3}$، ولأن يعطي "لا" هو: $\frac{1}{2} = (\frac{1}{4} + \frac{1}{4} + 1)\frac{1}{3}$ أي أن الاحتمالين متساويان لكي يكون هناك اتفاق أو تعاكس - وهذه هي، في الواقع، الخاصة (2).

من المهم أن نلاحظ أن الخاصتين (1) و (2) ***لاتتفقان*** مع أي نموذج واقعي محلي (أي مع أي نوع من الجمل الميكانيكية كالتي تخيلناها هنا) لنفترض أن مثل هذا النموذج الواقعي موجود. يجب أن تحضَّر الجملة الميكانيكية E عندئذٍ بحيث تعطي القياسات الممكنة A أو B أو C. لنلاحظ أنها لو كانت محضَّرة لإعطاء جواب ***احتمالي*** فقط لما أمكن عندئذٍ ***التأكد*** من أن الآلة p تعطي جواباً معاكساً لها في الاتجاهات A′ و B′ و C′ كما تتطلب الخاصة (1). وفي الحقيقة

يجب أن تكون أجوبة الآلتين ***كلتيهما*** على كل من القياسات الثلاثة الممكنة محضَّرة سلفاً بشكل واضح. لنفترض مثلاً أن الأجوبة هي "نعم"، "نعم"، "نعم" بالنسبة للاتجاهات A و B و C على الترتيب؛ عندئذٍ يجب أن يحضِّر جسيم الجهة اليمنى لكي يعطي الأجوبة "لا"، "لا"، "لا" بالنسبة للاتجاهات المقابلة في الجهة اليمنى. أمّا إذا كانت أجوبة الجهة اليسرى المحضَّرة هي: "نعم"، "نعم"، "لا"؛ وجب عندئذٍ أن تكون أجوبة الجهة اليمنى هي: "لا"، "لا"، "نعم". ومن السهل معالجة بقية الحالات الأخرى بنفس الطريقة. فهل يتفق هذا مع الخاصة (2)؟ أي هل عدد الأجوبة المتفقة يساوي عدد الأجوبة المتعاكسة؟ لاتبدو تشكيلة الأجوبة نعم، نعم، نعم / لا، لا، لا مشجعة جداً في هذا الخصوص لأنها تعطي 9 حالات من التعاكس مقابل 0 حالة من الاتفاق من أجل كل الأزواج الممكنة A/A′ و A/B′ و A/C′ و B/A′ ...إلخ. أمّا تشكيلة الأجوبة نعم، نعم، لا / لا، لا، نعم والتشكيلات المشابهة لها فتعطينا 5 حالات تعاكس و 4 حالات اتفاق (وللتحقق من ذلك يكفي أن نعدّها: نعم / لا، نعم / لا، نعم / نعم، نعم / لا، نعم / لا، نعم / نعم، لا / لا، لا / لا، لا / نعم، أي خمسة منها متعاكسة وأربعة متفقة). وهذا، بالطبع، أقرب بكثير لما تتطلبه الخاصة (2)، ولكنه ليس جيداً بصورة كافية، لأن ماهو مطلوب هو عدد متساو من التعاكس والاتفاق. لاتوجد إذن مجموعة من الأجوبة المحضَّرة التي بإمكانها أن تؤدي إلى الاحتمالات الكمومية، ***وينبغي استبعاد أي نموذج واقعي موضعي.***

التجارب بالفوتونات: هل هي معضلة النظرية النسبية؟

علينا أن نتساءل الآن: هل توجد تجارب فعلية تؤكد هذه التنبؤات الكمومية المذهلة. ذلك أن التجربة التي أتينا على وصفها هي تجربة افتراضية لم يتم إجراؤها بالفعل. لكنه تم إجراء تجارب أخرى مشابهة لم تستخدم فيها جسيمات ذات كتلة وسبين يساوي ½ وإنما أزواج من الفوتونات المستقطبة، وباستثناء هذا الفارق فإن التجارب المجراة هي، من حيث الأساس، كالتجربة التي سبق وصفها - عدا عن أن الزوايا هنا هي نصف ماكانت عليه في تجربة الجسيمات ذات السبين ½ (وذلك لأن سبين الفوتون يساوي 1 وليس ½). وقد تم قياس استقطاب أزواج من الفوتونات في تركيبات اتجاهات مختلفة وكانت النتائج على اتفاق تام مع تنبؤات النظرية الكمومية، لكنها لم تكن منسجمة مع أي نموذج واقعي محلي.

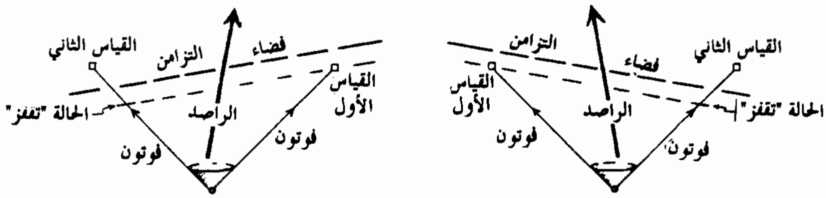
إن أكثر النتائج التجريبية التي تم الحصول عليها حتى الآن دقة واقناعاً هي نتائج تجارب آلان أسبيكت Alain Aspect (1986) وزملائه في باريس[15]. لكن لتجارب أسبيكت صفة طريفة أخرى تتجلى في أن "اختيار" نوع استقطاب الفوتونات الذي سيقاس لا "يقرَّر" إلا بعد أن تكون الفوتونات قد انطلقت في طيرانها. وهكذا، إذا تخيلنا وجود "تأثير" ما من النوع اللامحلي ينتشر من أحد كاشفي الفوتونات إلى الكاشف الآخر في الجهة المقابلة لكي يعلمه عن

الاتجاه الذي سيقاس فيه اتجاه استقطاب الفوتون الذي يقترب، وجدنا أن على هذا "التأثير" أن ينتشر بسرعة أكبر من سرعة الضوء! ينبغي إذن على أي وصف واقعي للعالم الكمومي، لكي يكون متفقاً مع الحقائق التجريبية، أن يكون بالضرورة ***لاسببياً***، بمعنى أنه يجب أن تكون الآثار قادرة على الانتقال بسرعة أكبر من سرعة الضوء.

لكننا رأينا في الفصل السابق أنه طالما أن النظرية النسبية صحيحة، فإن فكرة إمكان إرسال إشارات تنتشر بسرعة أكبر من سرعة الضوء تؤدي إلى نتائج منافية للعقل (وتتعارض، إضافة لذلك، مع شعورنا "بالإرادة الحرة"، أنظر ص259). هذا صحيح، لكن "التأثيرات" اللامحلية، التي تظهر في التجارب من النوع EPR، هي من طبيعة لايمكن استخدامها لإرسال الإشارات، لأنها لو كانت كذلك لأدت، وضوحاً، إلى نتائج منافية للعقل (وقد بيّن غيراردي **Ghirardi** وريميني **Rimini** وفيبر **Weber** عام 1980 بالتفصيل أنه لايمكن استخدام مثل هذه "التأثيرات" لإرسال الإشارات). إن من غير المفيد معرفة أن فوتوناً ما مستقطب "إمّا شاقولياً وإمّا أفقياً" (وليس مستقطباً، مثلاً، بالزاوية 60° أو 150°) مادمنا لانعرف أي واحد من هذين الخيارين هو الصحيح فعلاً. إن الجزء الأول من "المعلومات" (***أي اتجاهيْ*** الاستقطاب الممكنين) هو الذي ينتشر بسرعة أكبر من سرعة الضوء ("آنياً") بينما ينتشر الجزء الآخر (أي معرفة في أيّ من هذين الاتجاهين سيكون استقطاب الفوتون) بسرعة أبطأ كثيراً ويتم بوساطة إشارة عادية تنقل لنا ***نتيجة*** القياس الأول للإستقطاب.

على الرغم من أن التجارب من النوع EPR لاتتعارض إطلاقاً مع ***سببية*** النظرية النسبية، لأن الإشارات فيها لاتسير أسرع من الضوء، إلاّ أن هذه التجارب، مع ذلك، في تناقض واضح مع ***روح*** النظرية النسبية ومع تصور "الواقع الفيزيائي" الذي تمليه. دعونا نرى كيف يطبق المفهوم ***الواقعي*** لمتجهة الحالة على تحليل تجربة أسبيكت (على الفوتونات). تصف متجهة الحالة ***زوجاً*** من الفوتونات يتباعد أحدهما عن الآخر لكنهما يشكلان وحدة واحدة. ولايمكن أن نقرن بأي من الفوتونين على انفراد حالة موضوعية: فالحالة الكمومية هي حالة الفوتونين مأخوذين معاً. وليس لأي من الفوتونين بمفرده اتجاه استقطاب ذلك أن الاستقطاب هو صفة ذاتية لكليهما معاً. أمّا حين يُقاس استقطاب أحد هذين الفوتونين، تقفز متجهة الحالة بصورة يصبح معها الفوتون، الذي لم يجرَ عليه القياس، في حالة استقطابية محددة وحين يقاس، بعد ذلك، استقطاب هذا الفوتون الثاني، نحصل على قيم الاحتمال بصورة صحيحة بتطبيق القواعد الكمومية العادية على حالته الاستقطابية. ونحصل بهذه الطريقة على الأجوبة الصحيحة، وهذه هي، في الواقع، الطريقة التي نطبق بها عادة قواعد ميكانيك الكم. لكن هذا الأسلوب في المعالجة هو أسلوب لانسبوي أساساً، لأن قياسيْ الاستقطاب هنا هما من النوع الذي دعوناه حوادث ***مفصولة بمسافة مكانية***، وهذا يعني أن كلاً من حادثي القياس هذين يقع خارج مخروط الضوء للحادث الآخر، كما هو وضع النقطتين R و Q في الشكل 5-21. أمّا تساؤلنا حول

معرفة أي من حادثي القياس حدث أولاً بالفعل فليس بذي معنى فيزيائي لأن الإجابة عنه تتوقف على حركة "الراصد" (الشكل 6-32). فلو كان الراصد يتحرك بسرعة كافية نحو اليمين لوجد أن القياس في الجانب الأيمن هو الذي حدث أولاً، وبالعكس، لو كان يتحرك بسرعة كبيرة نحو اليسار لوجد أن القياس في الجانب الأيسر هو الذي حدث أولاً. (أي أن القياس الذي يسبب "القفزة" اللامحلية ليس نفسه في كلتا الحالتين). إن صورة الواقع الفيزيائي الزمكانية – حتى تلك الصورة الكمومية التي تأخذ بالحسبان بشكل صحيح آثار اللامحلية – تتناقض مع نظرية النسبية الخاصة. إنها أحجية صعبة لم يستطع "الواقعيون الكموميون" حلها بصورة مناسبة (راجع Aharanov and Albert, 1986) وسوف أعود لهذا الموضوع فيما بعد.



الشكل 6-32: تجربة من النوع EPR يصدر فيها فوتونان في اتجاهين متعاكسين ابتداءً من حالة سبينها صفر. يشكل راصدان مختلفان صورتين "للواقع" لاتتفق إحداهما مع الأخرى. فالراصد المتحرك نحو اليمين يحكم أن الجزء الأيسر من الحالة "يقفز" **قبل** إجراء القياس في هذا الجانب، علماً أن "القفز" يسببه القياس في الجانب الأيمن. أمّا الراصد المتحرك نحو اليسار فيكون حكمه معاكساً، إذ يرى أن الجزء الأيمن من الحالة هو الذي "يقفز" قبل إجراء القياس، وأن "القفز" يسببه القياس الذي أجري في الجانب الأيسر.

معادلة شرودنغر ومعادلة ديراك

لقد سبق ان أشرت، في بداية هذا الفصل، إلى معادلة شرودنغر التي هي معادلة حتمية معرَّفة جيداً. وهي معادلة شبيهة، من نواحٍ كثيرة، بمعادلات الفيزياء الكلاسيكية. وتدلنا النظرية على أنه طالما لم تجرَ قياسات (أو "عمليات رصد") على الجملة الكمومية فإن معادلة شرودنغر تبقى صالحة. وربما رغب القارئ في معرفة شكل هذه المعادلة الشهيرة. إنها تكتب كما يلي:

$$i\hbar\, \delta/\delta t\, |\psi\rangle = H|\psi\rangle$$

نذكر أن $\hbar$ هي الشكل الذي أدخله ديراك من ثابتة بلانك h، $\hbar = h/2\pi$ (وأن $i = \sqrt{-1}$)؛ أمّا المؤثر $\delta / \delta t$ (التفاضل الجزئي بالنسبة للزمن) الذي يؤثر على $|\psi\rangle$ فهو يمثل ببساطة معدل تغير $|\psi\rangle$ مع الزمن. إن ماتقوله معادلة شرودنغر هو أن $H|\psi\rangle$ يصف كيف يتطور $|\psi\rangle$.

ولكن ماهو "H"؟ إنه ببساطة التابع الهاملتوني الذي جرى الحديث عنه في الفصل السابق – إنما مع فارق أساسي. نذكر أن الهاملتوني الكلاسيكي هو عبارة ***الطاقة الكلية*** بدلالة مختلف إحداثيات الموضع q_i ومختلف مركبات الاندفاع p_i لكل الأجسام التي تتألف منها الجملة. أمّا الهاملتوني ***الكمومي*** فيتم الحصول عليه بأخذ العبارة ذاتها إنما بعد استبدال كل مركبة من مركبات الاندفاع p_i بجداء المؤثر التفاضلي "التفاضل الجزئي بالنسبة إلى q_i" بالثابت $-i\hbar$، وبالتحديد نستبدل p_j بالمؤثر $-i\hbar\ \delta / \delta q_i$. وبهذه الصورة يصبح الهاملتوني الكمومي **عملية** رياضية (معقدة نسبيا) تدخل فيها عمليات تفاضل وضرب، وليس مجرد ***عدد*** عادي. قد يبدو هذا لأول وهلة أشبه بالهراء، لكنه ليس مجرد شعوذة رياضية، إنه سحر أصلي، وهو ناجح! (لاشك في أن في عملية توليد هاملتوني كمومي انطلاقاً من مثيله الكلاسيكي شيء من "الفن"، لكن المهم هو أن مايلازم هذه الإجراءات من التباس وغموض يبدو قليل الأهمية جداً في نهاية المطاف).

من المهم أن نلاحظ أن معادلة شرودنغر (مهما يكن H الذي يدخل فيها) هي معادلة ***خطية؛*** ويقصد من ذلك أنه إذا كان $|\psi\rangle$ و $|\varphi\rangle$ كلاهما يحققان المعادلة، فإن $|\psi\rangle + |\varphi\rangle$ يحققها كذلك، وهذا ينطبق، في الحقيقة، على أي تركيب خطي من $|\psi\rangle$ و $|\varphi\rangle$ مثل $w|\psi\rangle + z|\varphi\rangle$ حيث w و z عددان عقديان. وهكذا فإن معادلة شرودنغر تحافظ على الانضمام الخطي العقدي لمتجهتي الحالة إلى مالانهاية. أي لايمكن لتركيب خطي (عقدي) لحالتين ممكنتين أن يتفكك (يصبح "غير منضم") بفعل الإجراء U وحده، وهذا هو السبب في أنه لابد من أن يؤثر الإجراء R، المنفصل عن U، لكي لايبقى سوى خيار واحد فقط في النهاية.

إن معادلة شرودنغر، شأنها شأن الصورية الهاملتونية في الميكانيك الكلاسيكي، ليست معادلة رياضية نوعية بقدر ماهي إطار عام تعمل داخله معادلات ميكانيك الكم. وعندما يتم الحصول على الهاملتوني الكمومي المناسب للحالة المدروسة، تسير الأمور في دراسة تطور الحالة مع الزمن وفقاً لمعادلة شرودنغر كما لو أن $|\psi\rangle$ كانت حقلاً كلاسيكياً خاضعاً لمعادلة كلاسيكية من معادلات الحقل من نوع معادلات مكسويل. وبالفعل إذا كانت $|\psi\rangle$ تمثل حالة فوتون ***فرد***، فإن معادلة شرودنغر ***تصبح*** مماثلة لمعادلات مكسويل. إن معادلة شرودنغر بالنسبة لفوتون فرد ليست سوى معادلة الحقل الكهرطيسي*. وهذا هو السبب في أن الفوتونات ***المنفردة،*** التي انصب اهتمامنا عليها حتى الآن، تسلك سلوك الحقل الكهرطيسي، وبصورة خاصة فيما يتعلق بالاستقطاب. وكمثال آخر على تطبيق معادلة شرودنغر لننظر في حالة

* هناك، على أية حال، فارق هام في نوع الحلول المسموحة للمعادلات في كلتا الحالتين. فمعادلات مكسويل هي بالضرورة ***حقيقية***، بينما حالات الفوتون ***عقدية***. وعدا عن ذلك هناك شرط يجب أن تحققه حالة الفوتون يدعى "شرط التواتر الموجب".

الإلكترون. فلو كانت $|\psi\rangle$ تصف حالة ***إلكترون*** فرد لتحولت معادلة شرودنغر إلى معادلة أخرى شهيرة هي معادلة ديراك – وهي المعادلة التي اكتشفها ديراك عام 1928 في الوقت الذي كان يساهم فيه بكثير من الإبداع ونفاذ البصيرة في تطوير النظرية الكمومية.

يجب أن توضع، في الحقيقة، معادلة ديراك على قدم المساواة مع معادلات مكسويل وأينشتين كواحدة من «معادلات الحقل العظيمة» في الفيزياء. ولايمكنني هنا إعطاء الانطباع المناسب حول عظمة هذه المعادلة لأن ذلك يتطلب مني الدخول في تفاصيل رياضية يمكن أن تصرفنا عما نحن فيه. ويكفي أن أشير إلى أن $|\psi\rangle$ في معادلة ديراك تبدي الخاصة الفرميونية الشهيرة وهي أنه لدى التدوير بزاوية °360 فإن $|\psi\rangle$ تتحول إلى $-|\psi\rangle$ (أنظر ص 316). وتشكل معادلات ماكسويل ومعادلة ديراك حجر الأساس في الإلكترودیناميك الكمومي، وهو نظرية الحقل الأكثر نجاحاً بين نظريات الحقل الكمومية حتى يومنا هذا، وهي النظرية التي سنتحدث عنها قليلاً فيما يلي.

نظرية الحقل الكمومية

لقد نشأ ماجرت العادة على تسميته "نظرية الحقل الكمومية" من اتحاد النظرية النسبية الخاصة وميكانيك الكم.وتختلف هذه النظرية عن ميكانيك الكم العادي (اللانسبوي) في أن عدد الجسيمات، من نوع معين ما، ليس بالضرورة ثابتاً. فلكل جسيم من نوع معين ***جسيمه المضاد*** (الذي قد يكون في حالات معينة، كما هو الحال بالنسبة للفوتون مثلاً، *مماثلاً* للجسيم نفسه). ويمكن لجسيم ذي كتلة أن يفنى مع جسيمه المضاد مولداً طاقة، كما يمكن أن يخلق زوج من جسيم وجسيم مضاد في عملية تختفي فيها طاقة. فعدد الجسيمات، بهذا المعنى، ليس محددا والانضمامات الخطية لحالات تحتوي على أعداد مختلفة من الجسيمات هي انضمامات مسموحة، وإن أعلى نظريات الحقل الكمومية هي مايسمى "الإلكترودیناميك الكمومي"، التي هي في الحقيقة نظرية الإلكترونات والفوتونات. وتتميز هذه النظرية بدقة تنبؤاتها (مثلاً: قيمة العزم المغنطيسي الدقيقة للإلكترون التي أشرنا إليها في الفصل السابق ص 196). إلاّ أن هذه النظرية ليست بالنظرية "النظيفة" تماماً – فهي تفتقر إلى التماسك والتناسق – بسبب أنها تؤدي في أحيان معينة إلى أجوبة "لانهائية" لامعنى لها. ولتجنيب النظرية هذه "اللانهايات" فقد أوجد إجراء يعرف باسم "إعادة الاستنظام" **renormalization**، لكن لايمكن تطبيقه، للأسف، في كل الأحوال على نظرية الحقل الكمومية.

هناك طريقة شائعة لفهم نظرية الحقل الكمومية تستخدم فيها "تكاملات الطريق" **path integrals** التي تتضمن تشكيل الانضمام الخطي ليس فقط لحالات الجسيم المختلفة (كما هو الأمر بالنسبة للدوال الموجية) وإنما كذلك "لتواريخ" كاملة مرسومة في الزمكان (راجع فاينمان **Feynman**، **1985** ففيه شرح مبسط لهذه الطريقة.). لكن هذه الطريقة أيضاً تظهر فيها

"لانهايات" خاصة بهـا، ولايكـون لهـا معنـى إلاّ إذا عوجلـت بوسـاطة "حيـل رياضيـة" مختلفـة تخلصها منها. وعلى الرغم من كل ماتملكه نظرية الحقل الكمومية من قـدرة لاشـك فيهـا ومـن دقة مذهلة (وذلك في الحالات القليلة التي يمكن أن تنجز النظريـة فيهـا بصـورة كاملـة)، إلا أن المرء لايملك إلا أن يفكر بأنه لابد أن يوجد أسـلوب أعمـق لفهـم الأمـور، وأنـه طالمـا أن هـذا الفهم الأعمق لم يحدث بعـد فـلا بـد أن يبقـى شـيء مـن عـدم الثقـة بالنسـبة لصـورة "الواقـع الفيزيائي" التي تزودنا بها هذه النظرية.(16)

لابد من التأكيد على حقيقة أن التوافق بـين النظريـة الكموميـة والنسـبية الخاصـة مـاهو إلا توافـق ***جزئـي*** لاغـير -مقتصـر علـى U فقـط - وهـو عـدا عـن ذلـك ذو طبيعـة شـكلية. أمّـا الصعوبات المتعلقة بتفسير "القفزات" الكمومية والتي توضحها تجارب من النوع EPR فلاتمسـها نظرية الحقل الكمومية حتى بمجرد مسّ. وإضافة لذلك لاتوجد حتى الآن نظريـة حقـل كموميـة للثقالة متماسكة أو مقبولـة. وسـوف أبيّـن في الفصـل الثـامن أنـه قـد لايكـون هـذان الأمـران مستقلين أحدهما عن الآخر† .

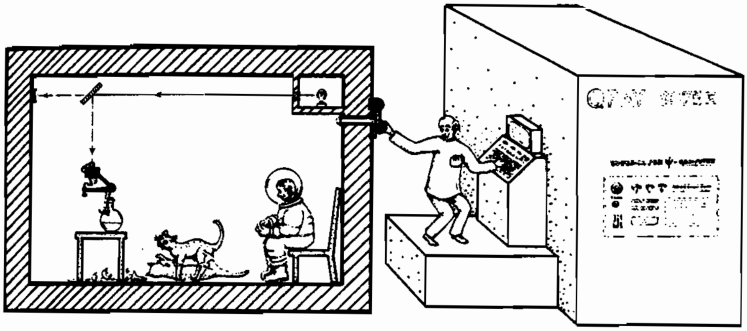
قطة شرودنغر

دعونا نعود في الختام إلى قضية مازالت تلاحقنا باستمرار منذ بداية هذا الفصل. لماذا يـاترى لانستطيع رؤية الانضمامات الخطية للحالات الكمومية حين يتعلق الأمـر بأجسـام كلاسـيكية؟ لماذا ياترى لانرى أجساماً مثل كرة المضرب في مكـانين في آن واحـد؟ مـاالذي يجعـل ترتيبـات معينة للذرات تشكل "أداة قياس" بحيث أن الإجراء R يحل محل U؟ ليس هناك أدنى شك في أن أي أداة قياس هي جزء من العالم الفيزيائي وهـي مؤلفـة مـن المكونـات الكموميـة نفسـها الـتي يفترض أن تكون الأداة قد صممت لاكتشاف سلوكها. فلمـاذا لاتعـامل أداة القيـاس والجملـة الفيزيائية المدروسة معاً ***كجملة كمومية واحدة مركبة***؟ لو تم هذا لأمكن تجنب تدخـل القيـاس "الخارجي" ذي الطبيعة الغامضة، ولوجب على الجملة المركّبة أن تتطور وفق الإجراء U. ولكـن هـل هذا ممكن حقاً؟ إن تأثير U في الجملة المركبة هو تأثير حتمي بصـورة تامـة لامكـان فيـه للارتيابـات الاحتمالية من النوع R التي يتضـمنها إجراء "القياس" أو "الرصد" الذي تقوم به الجملـة المركبـة على نفسها. إننا هنا أمام تناقض ظاهر، وقد جعل شرودنغر بتجربتـه التخيليـة الشـهيرة الـتي ابتدعهـا عـام 1935، والمعروفة باسم مفارقة قطة ***شرودنغر***، هذا التناقض جلياً ونابضاً بالحياة.

لنتخيل حاوية محكمة الإغلاق مبنية بصورة جيدة لدرجة أنه لايمكن لأي تأثير أن ينفذ عـبر جدرانها دخولاً إليها أم خروجاً منها. ثم لنتخيـل وجـود قطـة داخـل هـذه الحاويـة إضافـة إلى جهاز يمكن أن يتحرك بوساطة حدث كمومي ما. فإذا جرى هـذا الحـدث فعـلاً تحـرك الجهـاز

† يربط المؤلف في الفصل الثامن بين تفسير "القفزات" ونظرية الحقل الكمومية المنتظرة للثقالة.

وحطم زجاجة تحوي سمّ السيانيد (السيانور) وقُتلت القطة على الفور. أمّـا إذا لم يجر الحـدث فإن القطة تبقى حيّة. لقد كان الحدث الكمومي في الصورة التي ابتدعها شـرودنغر هـو تفكـك نواة ذات نشاط إشعاعي. لكنني سأدخل بعض التعديل وأعدّ الحدث الكمومـي هـو تـأثر خلية كهرضوئية بفوتون يصدر في حالة محددة سلفاً من منبع ضوئي ثـم ينعكس علـى مـرآة نصـف شفافة (الشكل 6-33). يقسم الانعكاس على المرآة دالة الفوتون الموجيـة إلى جزأيـن منفصلـين، ينعكس أحدهما بينما ينفذ الآخر من المرآة. أمّا الجزء المنعكس من دالة الفوتون الموجية فيجمـع على الخلية الضوئية بحيث أنه إذا سجلت الخلية الفوتون يكون هذا ***قد انعكس*** على المـرآة. وفي هذه الحالة يتحرر السيانيد وتُقتل القطة. أمّا إذا لم تسجل الخلية شيئاً فيكون الفوتـون ***قـد نفـذ*** عبر المرآة نصف الشفافة واصطدم بالجدار خلفها، وتكون القطة قد نجت.



الشكل 6-33: قطة شرودنغر – مع بعض الإضافات

هذا هو وصف مايجري داخل الحاوية من وجهة نظر مراقـب (جـريء دون شـك) موجـود ***داخل*** الحاوية. (لابد من تزويد هذا المراقـب، تجنبـاً لأي خطـر قـد يتعـرض لـه، بملابـس واقيـة مناسبة!) ***فإمّا*** أن يُعد الفوتون قد انعكس، لأن تسجيلاً في الخلية الضوئية قد "شـوهد"، والقطـة ماتت، ***أو*** يُعد الفوتون قد نَفَذ لأنه لم "يشاهد" أي تسجيل في الخلية، والقطة حيّة. إن مايحدث ***بالفعل*** هو هذا الأمر أو ذاك: فالإجراء R قد نُفّذ واحتمال كون القطة ميتـة (أو حيـة) هـو 50 بالمئة (وذلك لأن المرآة نصف شفافة). لنرَ الآن وجهـة نظـر فيزيـائي موجـود ***خـارج*** الحاويـة. يمكننـا أن نفـترض أن الفيزيـائي كـان "يعـرف"، قبـل إغـلاق الحاويـة، متجهـة الحالـة ***البدائيـة*** لمحتوياتها. (ليس من الضروري أن يعرف متجهة الحالة هذه عملياً، بل يكفي ألا يكون هناك في النظرية الكمومية مايمنع من أن تكون متجهة الحالة لمحتويات الحاوية معلومة، ***مـن حيـث المبـدأ***، بالنسبة له.) فمن وجهة نظر هـذا المراقـب الخـارجي لم يحـدث أي قيـاس، ولذلـك فـإن تطـور متجهة الحالة يجب أن يجري كله حسب الإجراء U. لقد تم إصدار الفوتون من المنبـع في حالتـه المحددة سلفاً – وكلا المراقبـين يتفقـان علـى هـذا – ثـم انقسـمت دالتـه الموجيـة إلى حزمتـين،

وكانت سعة أن يوجد الفوتون في كل منهما هي، ولنقل، $1/\sqrt{2}$ (بحيث يعطي مربع الطويلة احتمالاً قدره ½). وبما أن كل محتويات الحاوية تعامل كجملة كمومية واحدة موحدة من قبل المراقب الخارجي فإن الانضمام الخطي للخيارات يجب أن يبقى سائداً على كافة المستويات بما في ذلك مستوى القطة. فهناك سعة مقدارها $1/\sqrt{2}$ لأن تسجل الخلية الضوئية شيئاً ما وسعة مقدارها $1/\sqrt{2}$ لأن لاتسجل شيئاً البتة. وهذان الإمكانان يجب أن يكونا موجودين ***كليهما*** في الحالة بوزنين نسبيين متساويين، بشكل تركيب خطي. فمن وجهة نظر المراقب الخارجي تكون القطة في انضمام خطي لحالتي "الموت" و "الحياة"!

هل ينبغي أن نعتقد بالفعل أن الأمور يمكن أن تكون كذلك؟ لقد أشار شرودنغر نفسه بوضوح إلى أنه لايعتقد بذلك. وكانت حجته أن القاعدة U في ميكانيك الكم لايمكن، في الواقع، أن تطبق على شيء على درجة من الكبر والتعقيد مثل قطة. ولابد أن تكون معادلة شرودنغر قد فشلت في مكان ما خلال التجربة. وطبيعي أن يكون لشرودنغر الحق في أن يقول مايشاء بشأن معادلته، لكن هذا الامتياز لايتمتع به أحد سواه! ويصر عدد كبير من الفيزيائيين (وربما معظمهم)، على العكس من ذلك، على أنه تتوفر الآن دلائل تجريبية كثيرة في صالح الإجراء U – بينما لايوجد دليل واحد ضده – لدرجة أنه ليس لنا أي حق في التخلي عن هذا النمط من التطور، حتى ولو على مستوى قطة. لكننا إذا قبلنا بوجهة النظر هذه وصلنا إلى مفهوم ***ذاتي*** جداً للواقع الفيزيائي. فالقطة، بالنسبة للمراقب الخارجي، هي بالفعل في تركيب خطي لحالتي كونها "حية" وكونها "ميتة". فقط حين تفتح الحاوية، في نهاية التجربة، تختزل متجهة حالة القطة إلى هذه الحالة أو تلك من الحالتين السابقتين. أمّا بالنسبة لمراقب (محمي بصورة مناسبة) داخل الحاوية فإن اختزال متجهة حالة القطة يكون قد تم قبل ذلك بكثير، ولايكون للانضمام الخطي:

$$|\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}\{|\text{ميتة}\rangle + |\text{حية}\rangle\}$$

الذي يتخيله المراقب الخارجي أي معنى. ويبدو في نهاية المطاف أن متجهة الحالة هذه هي كلها "في ذهن المراقب"!

ولكن هل يحق لنا أن نتبنى مثل هذا الموقف الذاتي أو الشخصي بالنسبة لواقعية متجهة الحالة؟ لنتخيل أن المراقب الخارجي يقوم بعمل ما أكثر تعقيداً بكثير من مجرد "النظر" إلى مايوجد داخل الحاوية. لنفترض أنه، انطلاقاً من معرفته بالحالة الابتدائية لمحتويات الحاوية وباستخدام معادلة شرودنغر قام، بوساطة تجهيزات حاسوبية ضخمة، ***بحساب*** الحالة التي ينبغي أن تكون فيها بالفعل محتويات الحاوية، وأنه حصل على النتيجة ("الصحيحة") $|\psi\rangle$ (حيث تتضمن $|\psi\rangle$ بالفعل انضماماً خطياً لحالتي القطة "الميتة" و "الحية".) ولنتخيل بعد ذلك أنه أجرى على تلك المحتويات تجربة خاصة جداً تسمح له بأن يميز الحالة $|\psi\rangle$ من أية حالة أخرى متعامدة معها. (فبحسب مامر معنا سابقاً حول قواعد ميكانيك الكم يمكن، ***من حيث المبدأ***،

إجراء مثل هذه التجربة بالرغم مــن أنهـا ستكون في الواقـع العملـي صعبـة بصـورة لاتطـاق.) وسيكون احتمال الحصول على النتيجة "نعم، إن الجملة في الحالة <ψ|"، 100 بالمئة أمّـا احتمـال الحصول على النتيجة "لا، إنها في حالة متعامدة مع <ψ|" فسيكون صفراً بالمئة. وبصورة خاصة إن احتمال الحالة (المتعامدة مع <ψ|): <حية| – <ميتة| = <χ| يساوي الصفر. لايمكـن أن تنشأ استحالة الحالة <χ| كنتيجة للتجربة إلاّ بسبب وجود الحالتين <ميتة| و <حية| معاً وتداخلهما تداخلاً هداماً إحداهما مع الأخرى.

إننا نصل إلى الاستنتاجات نفسها إذا قمنا بتعديل طول مسار الفوتون (أو شفافية المرآة) قليلاً بحيث يكون لدينا، بدلاً من الحالة <ميتة| + <حية|، تركيب آخر ما مثل <حية|i – <ميتة|، إلخ. يجب أن يكون لكل من هذه التراكيب المختلفة من حالتي <ميتة| و <حية|، من حيث المبدأ، نتائج تجريبية متباينة، لدرجة أن مصير قطتنا التعيسة لاينتج من مجرد تعايش بين الموت والحياة، فكل التراكيب ***العقدية*** التي يمكن أن نتخيلها يجب أن تكون، من حيث المبدأ، متمايزة أحدها عن الآخر. ومع ذلك فبالنسبة للمراقب الموجود داخل الحاوية تبدو هذه التراكيب كلها غير ذات صلة بالوضع الحقيقي. فالقطة، بالنسبة له، إما ميتة وإما حية. فكيف نفهم مثل هذا الاختلاف في وجهات النظر إلى الواقع؟ سوف ألخص فيما يلي عدداً من وجهات النظر المختلفة التي تناولت هذه الأمور (وأموراً أخرى تتعلق بها) دون أن أدعي الإنصاف فيما بينها.

المواقف المختلفة من النظرية الكمومية الحالية

ينبغي التنويه، قبل كل شيء، إلى أنه من الواضح كم هو صعب إجراء تجربة كتلك المشار إليها أعلاه والتي يمكن بوساطتها تمييز الحالة <ψ| عن كل الحالات الأخرى <χ| المتعامدة معها. مامن شك في أن مثل هذا النوع من التجارب ***يستحيل*** على المراقب الخارجي ***إجراؤه عملياً***. لأن ذلك يتطلب منه، ضمن مايتطلب من أمور أخرى، معرفة متجهة الحالة للمحتويات كلها (بما فيها المراقب الموجود داخل الحاوية) وذلك قبل حتى أن يبدأ بحساب الحالة <ψ| في لحظة لاحقة. ولكننا نطلب أكثر من ذلك، نطلب أن تكون هذه التجربة ***مستحيلة من حيث المبدأ*** وليس فقط في الواقع العملي – لأنه لو لم يكن الأمر كذلك لما كان لنا الحق أن نحذف إحدى الحالتين "<حية|" أو "<ميتة|" من الواقع الفيزيائي. لكن المشكلة هي أن قواعد النظرية الكمومية، في شكلها الحالي، لاتحتاط لرسم خط واضح يفصل بين القياسات "الممكنة" وتلك "المستحيلة". ربما كان ***من الضروري*** وجود مثل هذا التمييز الواضح المعالم، لكن ماهو أكيد أن النظرية كما هي الآن لاتسمح بشيء من هذا القبيل، وسوف يعني إدخال مثل هذا التمييز إذن تغيير النظرية الكمومية.

هناك، من ناحية أخرى، وجهة النظر التي يشترك فيها عدد كبير من الفيزيائيين، والقائلة أنه لو أمكن أخذ ***البيئة*** بالحسبان على نحو ملائم لاختفت صعوبات النظرية. وبالفعل يصبح عندئذٍ

عزل محتويات الحاوية ***عزلاً تاماً*** عن العالم الخارجي أمراً يستحيل استحالة عملية حقيقية. فما إن تصبح البيئة الخارجية مؤثرة في الحالة داخل الحاوية حتى لايعود بإمكان المراقب الخارجي النظر إلى المحتويات الداخلية على أنها توصف بمتجهة حالة واحدة. حتى حالته هو نفسه تصبح على علاقة معها بصورة معقدة. وعدا عن ذلك سيصبح عدد الجسيمات المختلفة المؤثرة بصورة متشابكة هائلاً نظراً لأن آثار الانضمامات الخطية المختلفة الممكنة تنتشر أبعد فأبعد في الكون على أعداد أكبر فأكبر من درجات الحرية. فلاتوجد إذن أية وسيلة عملية (من نوع رصد آثار التداخل مثلاً) لتمييز هذه الانضمامات الخطية العقدية من الإمكانات البسيطة ذات الاحتمالات المعينة. والحقيقة ليس من الضروري إدخال موضوع عزل (أو عدم عزل) محتويات الحاوية عن الخارج. فالقطة نفسها مؤلفة من عدد هائل من الجسيمات. فمن الممكن إذن معاملة التركيب الخطي العقدي لقطة ميتة وقطة حية كما لو كان مجرد مزيج من الاحتمالات. وعلى أية حال فإنني لاأجد هذا مرضياً أبداً، لأن لنا الحق أن نتساءل، كما تساءلنا بمناسبة وجهة النظر السابقة: ترى، إبتداءً من أية مرحلة يعتبر الحصول على آثار ***التداخل*** "مستحيلاً" بصورة رسمية – بحيث يمكن أن نقرر أن مربعات طويلات السعات التي تدخل في التركيب الخطي العقدي، أصبحت تمثل احتماليْ الحالتين "ميتة" و "حية"؟ وحتى أن نفترض ***أن*** "واقع" العالم هو "بالفعل" هذه الأوزان الاحتمالية الممثلة بأعداد حقيقية، وأن نسأل كيف يتحول هذا الواقع إلى هذا الإمكان أو ذاك فقط؟ لست أرى حقاً كيف يمكن أن يتحول الواقع، منتقلاً من ***انضمام*** خطي عقدي للإمكانين إلى هذا الإمكان أو ذاك من هذين الإمكانين، على أساس التطور U فقط. يبدو أننا عدنا من جديد إلى تبني نظرة ذاتية أو شخصية للعالم.

يميل بعض الفيزيائيين أحياناً إلى تبني الرأي القائل أنه لايصح أن توصف الجمل المعقدة "بحالات"، وإنما بتعميم لهذا المفهوم يحمل اسم ***مصفوفة الكثافة*** (فون نويمان Von Neumann، 1955). تتضمن هذه المصفوفات في آن واحد الاحتمالات الكلاسيكية والسعات الكمومية. وهكذا فإن مجموعة من الحالات الكمومية المختلفة والعديدة هي التي تمثل الواقع. إن مصفوفات الكثافة مفيدة جداً، لكنها بذاتها لاتحل القضايا العميقة، التي تحتمل الجدل، والمتعلقة بالقياس في ميكانيك الكم. يمكننا كذلك تبني الموقف المتمثل في أن التطور الفعلي يجري وفق التطور الحتمي U، وأن الاحتمالات تنشأ بسبب عدم اليقين الذي يشوب معرفتنا للحالة الكمومية الفعلية التي توجد بها الجملة المركّبة. إن هذا يعني تبني موقف كلاسيكي جداً فيما يتعلق بمنشأ الاحتمالات – أي أنها تنشأ من الارتيابات المتعلقة بمعرفة الحالة الابتدائية.

يمكننا أن نتخيل كيف أن فروقاً طفيفة في حالة الجملة الابتدائية يمكن أن تؤدي إلى فروق هائلة في التطور اللاحق، كما هو الحال تقريباً في "الشواش" chaos الذي يمكن أن يحدث في بعض الجمل الكلاسيكية (راجع الفصل الخامس ص 217 حول ماذكر بشأن التنبؤ بالطقس.) لكن مثل هذه الآثار الشواشية لايمكن أن تنتج من U وحده، لالسبب إلاّ لأنه خطي: فأي

انضمام خطي، غير مرغوب فيه، يبقى إلى الأبد كما هو تحت تأثير U. ولكي يتحول انضمام ***خطي*** ما إلى هذا الإمكان أو ذاك، لابد من تدخل شيء ما ***لاخطي***، فالتطور U وحده لايقوم إذن بالمهمة.

وهناك وجهة نظر أخرى مفادها أن الفرق الوحيد الواضح والصريح بين المشاهدة والنظرية في حالة قطة شرودنغر يبدو أنه عائد لكوننا نتعامل مع ***مراقبين واعين***، واحد (أو اثنان) منهم داخل الحاوية وآخر خارجها. وأنه ربما كانت قواعد الانضمام الخطي الكمومية لاتطبق على المخلوقات الواعية. وقد قدم فيغنر (1961) نموذجاً رياضياً أولياً لما تقتضيه وجهة النظر هذه، مفترضاً أن خطية معادلة شرودنغر يمكن ألاّ تكون صحيحة في حالة الكائنات الواعية (أو حتى "الحية") واقترح أن يستبدل بها إجراء لاخطي بحيث ينتهي الأمر إلى ظهور هذا الإمكان أو ذاك. ربما بدا للقارئ أنه، بما أنني أبحث عن دور ما للظواهر الكمومية في تفكيرنا الواعي - وهو ماأقوم به بالفعل - ينبغي أن أجد وجهة النظر هذه ملائمة ومؤيدة لما أبحث عنه. ولكنني غير معجب بها قط، لأنها، كما يبدو لي، تقود إلى نظرة مشوشة غير قويمة لواقع العالم. من الممكن أن تكون الأمكنة التي يقطنها الوعي (الشعور) من هذا الكون قليلة جداً ومتباعد بعضها عن الآخر. وبحسب وجهة النظر هذه لاتتحول الانضمامات الخطية الكمومية إلى خيارات فعلية إلا في هذه الأمكنة فقط. ومن الممكن ألاّ تكون هذه الأمكنة، بالنسبة لنا، مختلفة أو متميزة عن الأماكن الأخرى في الكون، لأن كل مانشاهده (أو نرصده) يجب أن يتحول، بفعل رصدنا الواعي، إلى "إمكانات"، وذلك بغض النظر عن أن هذا التحول قد تم من قبل أم لا. إن وجهة النظر غير القويمة هذه، تؤدي إلى صورة مشوشة جداً للواقع ولايمكن قبولها إلا بكثير من التحفظ.

وهاهي وجهة نظر أخرى، قريبة من السابقة، تحمل اسم "الكون التشاركي" participatory universe (كان قد اقترحها ويلر J.A.Wheeler عام 1938) وتعطي للشعور دوراً هاماً، وتنطلق من ملاحظة أن تطور الحياة الواعية على كوكبنا هو، إلى حد ما، نتيجة لطفرات وراثية مناسبة حدثت في عصور مختلفة. ويحتمل أن تكون هذه الطفرات أحداثاً كمومية وأنها وجدت فقط في شكل انضمامات خطية إلى أن أدت إلى تطور كائن واع، يتوقف وجوده نفسه على كل الطفرات المناسبة التي حدثت فعلاً. فوجودنا نفسه، وفق وجهة النظر هذه، هو الذي يستحضر ماضينا إلى الوجود! إنني مدرك أن ماتتضمنه هذه المحاكمة من مفارقة ودورية هو الذي يعجب البعض، أمّا بالنسبة لي فإنني أجدها مقلقة دون ريب، وفي الحقيقة من الصعب القبول بها.

وإليكم وجهة نظر أخرى، منطقية بطريقتها الخاصة، لكنها تؤدي إلى صورة ليست أقل غرابة للواقع الفيزيائي، وهي مايسمى ***بالعوالم المتعددة*** many worlds، كان قد اقترحها في البداية إيفريت الثالث H.Everett III عام 1957. وبحسب تفسير وجهة النظر هذه لايحدث

التطور الذي يمثله R إطلاقاً. وإن تطور متجهة الحالة – التي ينظر إليها نظرة واقعية – محكوم دوماً بالإجراء الحتمي U. وهذا يقتضي أن تكون قطة شرودنغر التعيسة، هي والراصد المرتدي الملابس الواقية والموجود داخل الحاوية، موجودان بالفعل في شكل تركيب عقدي خطي، بحيث تكون القطة على شكل انضمام خطي من الموت والحياة. وتكون حالة "الموت" مرتبطة بإحدى حالات شعور الراصد الداخلي بينما تكون حالة "الحياة" مرتبطة بحالة أخرى (وربما بحالة من حالات شعور القطة، جزئياً على الأقل، وكذلك بحالة من شعور الراصد الخارجي أيضاً حين تفتح الحاوية في نهاية التجربة وتنكشف له محتوياتها.) فهنا يُنظر إلى شعور كل من الراصدين وكأنه "مشطور" بحيث أن الراصد موجود مرتين وكل حالة من حالتيْ وجوده تخوض تجربة مايجري بصورة مختلفة (فترى إحداهما، مثلاً، قطة ميتة وترى الأخرى قطة حية.) ليس الراصد وحده هو الذي ينشطر وإنما ينشطر الكون كله، حيث يقطن، إلى نسختين (أو أكثر) لدى كل "قياس" يجريه على العالم. ويتكرر هذا الانشطار المرة تلو المرة ليس فقط لدى كل "قياس" يجريه أحد المراقبين، وإنما كذلك يسبب تضخيم الحوادث الكمومية عموماً، بحيث يتشعب الكون بسرعة إلى عدد هائل من "الفروع". لايمكن القول أن وجهة النظر هذه اقتصادية، لكن اعتراضاتي عليها لاتنبع من افتقارها للاقتصاد. وبصورة خاصة لاأرى لماذا ينبغي ألا يكون الكائن الواعي واعياً إلاّ "لواحد" فقط من الإمكانات التي تؤلف الانضمام الخطي. فما هي آلية الشعور تلك التي تفرض علينا ألا نستطيع "إدراك" ذلك التركيب الخطي المخيف من الحياة والموت؟ ويبدو لي أنه لابد قبل أن نتمكن من بحث اتفاق نظرية العوالم المتعددة مع مانشاهده من أن توجد نظرية للشعور. فأنا لاأرى كيف يمكن الربط بين متجهة الحالة "الحقيقية" للكون ومايفترض أننا نشاهده. ويدعي بعضهم أن "الوهم" الذي يمكن أن يجري التطور R بحسبه يمكن أن يفسَّر بالفعل ضمن إطار هذه الصورة، لكنني لاأعتقد أن لمثل هذه الادعاءات مايبررها. وعلى أية حال، يبدو لي أنه لايمكن لهذا المخطط أن يعمل ما لم تضف إليه عناصر أخرى. وفي رأيي أن فكرة العوالم المتعددة تثير من القضايا أكثر مما تحل، وذلك دون أن تمس جوهر لغز القياس الكمومي. (راجع De witt and Graham، 1973).

وأخيرا، أين نحن من هذا كله؟

إن ألغاز الفيزياء الكمومية، في حالتها الراهنة، باقية مهما كان التفسير الذي نتبناه. لنراجع باختصار ماتعلمناه من النظرية الكمومية السائدة (القياسية) حول الطريقة التي نصف بها العالم، مؤكدين، بصورة خاصة، على القضايا المتعلقة بهذه الألغاز، ولنطرح بعد ذلك السؤال حول ماينبغي عمله ابتداءً من هذا.

ينبغي قبل كل شيء، التذكير بأن النظرية الكمومية لاتطبق بصورة معقولة (وربما مفيدة؟) إلا على ماصطلح على تسميته ***المستوى الكمومي*** - أي مستوى الجزيئات والذرات والجسيمات دون الذرية، لكنها تطبق أيضاً على الأجسام ذات الأبعاد الأكبر طالما بقيت فروق الطاقة بين الإمكانات المختلفة صغيرة. وفي هذا ***المستوى الكمومي*** يجب أن تعامل مختلف "الإمكانات" وكأنها أشياء يمكن ***أن توجد*** معاً على شكل انضمام خطي عقدي، معاملاته تدعى ***سعات الاحتمال***. وكل مجموعة من هذه الإمكانات ***مبنية*** بهذا الشكل بمعاملات عقدية تعين ***حالة كمومية*** وكل جملة كمومية ينبغي أن توصف بوساطة إحدى هذه الحالات. وغالباً لايكون هناك - وهذا واضح بصورة خاصة في حالة ***السبين*** - مايسمح بالتمييز بين تركيب "الإمكانات" والإمكانات "الفعلية" المؤلِّفة للحالة الكمومية. وعلى أية حال، وطالما أن الجملة باقية في المستوي الكمومي، فإن حالتها الكمومية تتطور بطريقة ***حتمية*** تماماً، وذلك وفق الإجراء U الذي تحكمه ***معادلة شرودنغر***.

أما حين تُضخم آثار الإمكانات الكمومية المختلفة حتى تبلغ ***المستوى الكلاسيكي*** بحيث تصبح الفروق بين هذه الإمكانات كبيرة لدرجة يمكننا معها رؤيتها، فإنه يبدو أن الانضمامات الخطية ذات المعاملات العقدية، لايعود لها وجود. وعند ذلك تصبح مربعات طويلات السعات العقدية (أي مربعات أبعاد النقاط عن المبدأ في المستوى العقدي) هي التي يجب أن تؤخذ بالحسبان، وهذه الأعداد ***الحقيقية*** تقوم الآن بدور جديد هو دور ***الاحتمالات*** النسبية لهذه الإمكانات. ولايبقى من هذه الإمكانات سوى إمكان ***واحد*** فقط بنتيجة إجراء قياس فيزيائي فعلي، وهذا التطور يصفه الإجراء R (المسمى اختزال متجهة الحالة أو انهيار الدالة الموجية) وهو إجراء يختلف كل الاختلاف عن U. هنا، وهنا فقط، تدخل لاحتمية النظرية الكمومية مسرح الأحداث.

يمكن، وبحجج قوية، دعم الرأي القائل أن الحالة الكمومية تمثل صورة ***موضوعية***. لكن الحالات الكمومية تصبح معقدة جداً حين يتعلق الأمر بعدة جسيمات. ولاتعود، عندئذٍ، للجسيمات المفردة "حالات" خاصة بها، ولاتوجد إلا بشكل "تشابكات" معقدة مع الجسيمات الأخرى، يطلق عليها اسم ***الترابط*** correlation. فحين يتم "رصد" أحد الجسيمات في مكان ما، بمعنى أن هذا الرصد يؤدي إلى أثر من نوع مايتم تضخيمه إلى المستوى الكلاسيكي، يبدأ الإجراء R عندئذٍ بأخذ مجراه. لكن هذا الإجراء يؤثر، ***بصورة آنية***، في كل الجسيمات التي بينها وبين الجسيم المرصود ترابط. وإن تجارب من النوع EPR (أينشتين - بودولسكي - روزن)، كمثل تلك التي أجراها أسبكت - التي تنطلق فيها من منبع كمومي واحد أزواج من الفوتونات في اتجاهين متعاكسين ثم يُقاس استقطابها بعد أن تكون قد ابتعدت عن بعضها مسافة عدة أمتار - تعطي تأكيداً تجريبياً واضحاً لحقيقة محيّرة إنما أساسية في الفيزياء الكمومية: ***اللامحلية*** (وهي الحقيقة التي أكدتها تجارب أسبكت والقائلة أنه لايمكن معاملة

الفوتونات كما لو كانت مكونات مستقلة أي كل منها في موضع مستقل عن الآخر). فلو نظرنا إلى الإجراء R على أنه يجري بصورة موضوعية (وهو مايبدو أن موضوعية الحالة الكمومية تقتضيه) لاصطدمنا بتناقض مع روح النظرية النسبية الخاصة. ويبدو أنه ***لاوجود لوصف زمكاني موضوعي*** لاختزال متجهة الحالة يتفق مع متطلبات النظرية النسبية! ومع ذلك فإن نتائج نظرية الكم المشاهدة لاتخرق النظرية النسبية† .

لاتقول النظرية الكمومية شيئاً حول متى وكيف يحدث بالفعل الإجراء R (أو يبدو أنه يحدث؟). وهي إضافة لذلك لاتوضح فعلاً لماذا "يبدو" عالم المستوى الكلاسيكي كلاسيكياً، علماً أن "معظم" الحالات الكمومية لاتشبه الحالات الكلاسيكية إطلاقاً!

ماالعمل إذن في هذه الظروف؟ أعتقد أن علينا أن ننظر بصورة جدية إلى إمكان أن يكون ميكانيك الكم، ببساطة، غير صحيح حين يطبق على أجسام جهرية أو، بصورة أخرى، أن لا يكون الإجراءان U و R سوى تقريبين ممتازين لنظرية أكثر كمالاً لكنها لم تكتشف بعد. إن ***الجمع*** بين هذين الإجراءين وليس أخذ الإجراء U وحده، هو الذي يوفر الحصول على الاتفاق الرائع مع التجربة، هذا الاتفاق الذي تنعم به النظرية الحالية.

فلو أمكن أن تمتد خطية U إلى العالم الجهري لكان علينا أن نقبل فكرة أن للتركيبات الخطية لمختلف مواضع (أو لمختلف سبينات، إلخ) كرات المضرب (أو أية أجسام جهرية أخرى) واقع فيزيائي. لكن الحس السليم يدلنا على أن هذه ليست الطريقة التي يسير العالم بحسبها فكرات المضرب توصف بوساطة الفيزياء الكلاسيكية بتقريب جيد جداً. وهي ذات مواضع محددة تماماً بصورة معقولة، إذ لانراها توجد في مكانين في آن واحد، كما تتيح لها قوانين ميكانيك الكم الخطية، فلو وجب استبدال قانون أكثر شمولاً بالإجرائين U و R، لوجب بالتأكيد أن يكون هذا القانون الجديد، بعكس معادلة شرودنغر، ذا طبيعة ***لاخطية*** (على الأقل لأن R نفسه لاخطي). لكن هناك من يعترض على هذا مشيراً بحق إلى أن الرشاقة الرياضية العميقة للنظرية الكمومية القياسية تعود بالتحديد إلى كونها ***خطية***. هذا صحيح، لكنني سأدهش أشد الدهشة فيما لو لم يكن على النظرية الكمومية أن تتعرض لتعديلات أساسية في المستقبل، تعديلات تصبح معها هذه الخطية مجرد تقريب. ولن تكون هذه هي المرة الأولى التي تحدث فيها مثل هذه التغييرات في الفيزياء. فقد كانت نظرية نيوتن في التثاقل العالمي تدين برشاقتها وفعاليتها إلى كونها خطية. ومع ذلك تبين بظهور نظرية أينشتين النسبية العامة أن

---

† الحقيقة أن نتائج تجارب أسبكت تخرق، ***كما يبدو***، نظرية النسبية لأن الجسيم الثاني (البوزترون مثلاً) يأخذ علماً بقياس الجسيم الأول (الإلكترون) بسرعة تفوق سرعة الضوء! ولكن هذا لايعني إنكار صحة النسبية الخاصة التي تؤكدها كثير من التجارب

هذه الخطية لم تكن سوى تقريب (جيد على أية حال)، كما تبين، إضافة لذلك، أن نظرية أينشتين تفوق برشاقتها نظرية نيوتن!

لم أتردد في التصريح بأن في اعتقادي أن حل الأحاجي التي تطرحها النظرية الكمومية يكمن في إيجاد نظرية جديدة محسنة. وعلى الرغم من أن وجهة النظر هذه ليست هي السائدة بين الفيزيائيين إلا أنها مع ذلك ليست بوجهة النظر المتفردة. (فقد كان هذا رأي العديد من الأوائل مؤسسي النظرية الكمومية، ذكرت منهم أينشتين. لكن شرودنغر، عام 1936، وكذلك دوبروي، عام 1956، وديراك، عام 1939، صرحوا بأراء تصب في هذا الاتجاه.) ولكن حتى إذا افترضنا أن النظرية يجب أن تعدَّل بشكل ما، فإن الصعوبات المتعلقة بأسلوب التعديل هي صعوبات هائلة. وربما تبين في النهاية أن نظرية من نوع "المتحولات الخفية" تصبح مقبولة. لكن من المؤكد أن اللامحلية التي تظهرها تجارب من النوع EPR تجعل أي وصف "واقعي" للعالم في زمكان عادي مسألة محفوفة بالصعوبات، وأعني بالزمكان هنا الفضاء الزماني - المكاني من النوع الذي ينسجم مع مبادئ النظرية النسبية. ولذلك فإنني أعتقد أن التعديل الواجب إجراؤه هو تعديل جذري. وعدا عن ذلك لم يحدث حتى الآن أن وجد دليل واحد على الخلاف بين تنبؤات النظرية والمشاهدات التجريبية، عدا - اللهم - إذا نظرنا إلى ماهو واضح من عدم وجود انضمامات خطية لكرة المضرب كدليل على وجود مثل هذا الخلاف. وبرأيي أن عدم وجود انضمامات خطية لكرة المضرب هو بالفعل دليل على الخلاف. لكن هذا، بحد ذاته، لايجعلنا نتقدم. فنحن نعلم جيداً أن القوانين الكمومية صحيحة تماماً في المستوى المجهري، أمّا في مستوى كرات المضرب فالفيزياء الكلاسيكية هي الصحيحة. وفي رأيي أنه ينبغي علينا اكتشاف نوع جديد من القوانين في المستوى المتوسط بين المستويين السابقين، لكي نفهم كيف يبزغ العالم الكلاسيكي من العالم الكمومي. وأعتقد كذلك أن هذا النوع الجديد من القوانين هو الذي يلزمنا لفهم كيفية عمل العقل. ولهذه الأسباب كلها أعتقد أنه ينبغي علينا البحث عن حلول جديدة.

لقد كنت خلال شرحي للنظرية الكمومية في هذا الفصل ملتزماً بوجهة النظر السائدة، على الرغم من أنني، في بعض المواضع، كنت أكثر من المعتاد ميالاً إلى "الهندسة" و "الواقعية". وسيكون الفصل التالي مكرساً للبحث عن حلول جديدة - حلول يجب أن تدلنا، كما يبدو لي، في أي اتجاه يجب أن نبحث للوصول إلى ميكانيك كمومي جديد محسَّن. وعلى الرغم من أن رحلتنا ستبدأ من مكان قريب من مواطننا إلاّ أننا سنضطر للسفر بعيداً عنها لأنه، كما سنرى، سيتوجب علينا استكشاف مناطق في الفضاء بعيدة جداً، وامتطاء مسار الزمن عائدين إلى الماضي البعيد جداً، إلى بداية الزمن نفسه!

الملاحظات

1 - إنني أفترض أنه من المفروغ منه أن أية وجهة نظر فلسفية لايمكن أن توصف بأنها "جدية" إلاّ إذا كانت تحتوي على مقدار جيد من الواقعية. وإنه ليدهشني دوماً أن أرى مفكرين في الظاهر "جديين" - في غالبيتهم فيزيائيين تشغلهم قضايا ميكانيك الكم - يتبنون مواقف شخصية جداً تقول "بعدم وجود" عالم "خارجي" حقيقي. فإذا كنت قد تبنيت نهجاً واقعياً، كلما حانت لي الفرصة، فذلك ليس بسبب نقص في معلوماتي، فأنا على علم تام بالمفاهيم الذاتية التي يتبناها البعض، ولكن لأن هذه المفاهيم لاتعني شيئاً بالنسبة لي. وتجدون في غاردنر Gardner، 1938 - الفصل الأول هجوماً عنيفاً، ومسلياً على وجهات النظر الذاتية.

2 - لقد لاحظ بالمر Balmer في عام 1885 أن لتواترات الخطوط الطيفية للهدروجين الشكل $R(n^{-2} - m^{-2})$ حيث n و m عددان صحيحان موجبان (و R ثابتة).

3 - قد يكون من المناسب ألا نتخلى مباشرة عن صورة العالم هذه حيث كل شيء ليس إلاّ حقلاً. فقد أمضى أينشتين، الذي كان (كما سنرى) مدركاً تماماً للظواهر المتقطعة التي تبديها الجسيمات الكمومية، الأعوام الثلاثين الأخيرة من عمره محاولاً إيجاد نظرية كلاسيكية من هذا النوع بحيث تكون شاملة وموحِّدة. لكن محاولات أينشتين هذه، شأنها شأن غيرها من المحاولات، لم يكتب لها النجاح. إذ يبدو أنه لابد من إضافة شيء ماللحقل الكلاسيكي لكي يمكن تفسير الطبيعة المتقطعة للجسيمات.

4 ـ هناك وصف لإجراءيْ التطور هذين في كتاب، أصبح يعد كلاسيكياً، للرياضي الأميركي، الهنغاري الأصل، فون نويمان (1955). "فالعملية 1" عنده هي ماأسميه هنا R - اختزال متجهة الحالة - و "العملية 2" عنده هي ماأسميته U - عملية التطور "الواحدي"، أي التي تبقى خلالها سعات الاحتمال محفوظة. وفي الحقيقة توجد طرق أخرى - مكافئة - لتمثيل تطور الحالة الكمومية U، لايستخدم فيها تعبير "معادلة شرودنغر". ففي "***تمثيل هايزنبرغ***"، مثلاً، توصف الحالة بحيث تبدو وكأنها لاتتطور إطلاقاً، أمّا التطور الديناميكي فيؤخذ بالحسبان بانزياح مستمر لمعنى إحداثيات الموضع ومركبّات الاندفاع. إن الفروق ليست بذات بال بالنسبة لما نحن فيه هنا طالما أن مختلف طرق تمثيل التطور U متكافئة تماماً.

5 ـ يجب، بهدف أن نستكمل الأمور، ذكر جميع القواعد الجبرية الخاصة بفضاء هلبرت. وسوف نذكرها فيما يلي مستخدمين رموز ديراك، المستخدمة في النص:

$$
\begin{aligned}
&|\psi\rangle+|\chi\rangle = |\chi\rangle+|\psi\rangle, && |\psi\rangle+(|\chi\rangle+|\varphi\rangle) = (|\psi\rangle+|\chi\rangle)+|\varphi\rangle,\\
&(z+w)|\psi\rangle = z|\psi\rangle+w|\psi\rangle, && z(|\psi\rangle+|\chi\rangle) = z|\psi\rangle+z|\chi\rangle,\\
&z(w|\psi\rangle) = (zw)|\psi\rangle, && 1|\psi\rangle = |\psi\rangle,\\
&|\psi\rangle+\mathbf{0} = |\psi\rangle, && 0|\psi\rangle = \mathbf{0}, \qquad z\mathbf{0} = \mathbf{0}.
\end{aligned}
$$

6 ـ هناك عملية هامة، تدعى الجداء السلّمي (أو الجداء الداخلي) لمتجهتين يمكن أن تفيد لتوضيح مفاهيم "متجهة الواحدة" و "التعامد" و "سعة الاحتمال" بصورة بسيطة جداً. (في جبر المتجهات العادي يكون الجداء السلّمي لمتجهتين هو $ab\cos\theta$ حيث a و b هما طويلتا المتجهتين و θ الزاوية بين اتجاهيهما.) أمّا الجداء السلّمي لمتجهتين من فضاء هلبرت فهو عدد ***عقدي***. ويكتب الجداء السلّمي لمتجهتي حالة $|\psi\rangle$ و $|\chi\rangle$ بالشكل $\langle\psi|\chi\rangle$. وهناك عدد من القواعد الجبرية تحكمه:

$$\langle\psi(|\chi\rangle + |\varphi\rangle) = \langle\psi|\chi\rangle + \langle\psi|\varphi\rangle$$

و: $$\langle\psi(q|\chi\rangle) = q\,\langle\psi|\chi\rangle$$

و: $$\langle\psi|\chi\rangle = \overline{\langle\chi|\psi\rangle}$$

حيث يشير الخط فوق الجداء إلى المرافق العقدي. (إن المرافق العقدي لِ: $z = x + iy$ هو $\bar{z} = x - iy$ حيث x و y عددان حقيقيان. لنلاحظ أن $|z|^2 = z\bar{z}$. وتعبر العلاقة $\langle\chi|\psi\rangle = 0$ عن تعامد المتجهتين $|\psi\rangle$ و $|\chi\rangle$. ومربع طويلة $|\psi\rangle$ هو $\langle\psi|\psi\rangle = |\psi|^2$ بحيث أن شرط كون $|\psi\rangle$ مستنظماً هو $\langle\psi|\psi\rangle = 1$. إذا سبب "إجراء قياس" أن "تقفز" الحالة $|\psi\rangle$ إمّا إلى الحالة $|\chi\rangle$، أو إلى أي شيء متعامد مع $|\chi\rangle$، كانت سعة احتمال "القفز" إلى < | هو < | >، بشرط أن يكون كل من < | و < | مستنظماً. أمّا إذا لم يكونا مستنظمين فإن سعة احتمال "القفز" من $|\psi\rangle$ إلى $|\chi\rangle$ تكون: $\langle\psi|\chi\rangle\langle\chi|\psi\rangle / \langle\psi|\psi\rangle\langle\chi|\chi\rangle$ (أنظر Dirac، 1947).

7 ـ بالنسبة للقراء الذين يعرفون شكلية المؤثرات في ميكانيك الكم، يعرف هذا القياس (باستخدام رموز ديراك) بوساطة المؤثر الهرميتي المحدود $|\chi\rangle\langle\chi|$. إن القيمة الذاتية 1 لهذا المؤثر (حيث $|\chi\rangle$ مستنظمة) تعني الجواب "نعم" والقيمة الذاتية 0 تعني "لا". (تنتمي المتجهتان $\langle\chi|$ و $\langle\psi|$ ..إلخ إلى الفضاء الثنوي **dual** لفضاء هلبرت الأصلي.) راجع بهذا الخصوص Von Neumann، 1955 و Dirac، 1947.

8 ـ لقد قدمت، حتى الآن، وصفاً مبسطاً جداً للجملة الكمومية المؤلفة من جسيم واحد حيث أنني أهملت السبين وافترضت إذن أن حالة الجسيم يمكن أن تحدد بوساطة موضعه فقط. توجد في الواقع جسيمات معينة، تدعى الجسيمات السلّمية – منها مثلاً الجسيمات

النووية المسماة بيونـات (ميزونـات π، راجـع ص 264) وكذلـك ذرات معينـة - يكـون سبينها مساوياً الصفر. إن الوصف الذي قدمته حتى الآن، بدلالة الموضع لوحـده، يكفـي في حالة مثل هذه الجسيمات (ومثلها فقط).

9 - إن $|\swarrow\rangle = \bar{z}|\uparrow\rangle - \bar{w}|\downarrow\rangle$

حيث z و w هما المرافقان العقديان للعدين z و w (أنظر الملاحظة 6)

10 - يوجد جهاز تجريبي معروف، يعـرف باسـم جهـاز شـتيرن وغـيرلاخ Stern - Gerlach، يمكن استخدامه لقيـاس سـبين ذرات محضّـرة بصـورة مناسـبة. لهـذا تُدفـع الـذرات علـى شكل حزمة تمرر خلال حقل مغنطيسي غير منتظم بصـورة كبـيرة. ويكـون اتجـاه تـدرج الحقل هو الاتـجاه الذي يقاس فيه السـبين. تنقسـم حزمة الذرات إلى حزمتيـن (في حالـة ذرات سـبينها ½، وإلى أكثـر من حزمتيـن إذا كـانت قيمـة السـبين أكـبر)، بحيـث أن إحدى الحزمتيـن هي حزمة الذرات التي يكون الجواب عن السـؤال من النوع نعـم أو لا، الذي يطرحه قياس السبين، هو "نعم"، بينما تكون الحزمـة الأخرى مقابلـة للجواب "لا". هناك - للأسـف - أسـباب تقنية، لافائدة من شرحها هنا، تجعل هذا الجهـاز غـير صـالح لقياس سبين الإلكترون، ولابد لذلك من اللجوء إلى عمليات غير مباشـرة. (راجـع Mott and Massey، 1965). ولهذا السبب، ولأسباب أخرى، أفضل ألا أحدد كيف يتم إجراء قياس سبين الإلكترون بالفعل.

11 - يمكن للقارئ الهمام الذي يرغب في التأكد من صـحة النتيجـة المذكـورة أن يتوصـل إلى ذلك بسـهولة إذا وجّه كرة ريمان بحيث يكون الاتجـاه α "للأعلى" بينما يقـع االاتجـاه β في المستوى الذي يشـكله الاتجاهـان "للأعلى" و"لليمين"، أي أنـه محـدد بوساطـة $q = \tan \frac{\theta}{2}$ على كرة ريمان. ويتم الحصـول عندئـذ علـى النتيجـة المذكـورة باسـتخدام القـاعدة الـتي تنص علـى أن سـعة احتمال "القفـز" مـن الحالـة $|\psi\rangle$ إلى الحالة $|\chi\rangle$ تسـاوي: $\langle\chi|\psi\rangle\langle\psi|\chi\rangle / \langle\chi|\chi\rangle\langle\psi|\psi\rangle$ (أنظر الملاحظة 6).

12 - نقول، بلغة الرياضيات، أن فضاء الحالات لجسيمين هو الجداء التنصوري لفضاء حـالات الجسـيم الأول في فضـاء حـالات الجسـيم الثـاني. وتكـون الحالـة $|\varphi\rangle|\chi\rangle$ هـي الجـداء التنصوري للحالة $|\chi\rangle$ في الحالة $|\varphi\rangle$.

13 - وولفغانغ باولي Wolfgang Pauli هو فيزيائي لامع من أصل نمساوي، واحد المشـاهير في تاريخ ميكانيك الكم. وضع مبـدأ الاسـتبعاد، المعروف باسمه، على شـكل فرضيـة عـام 1925. أمّا المعالجة الكمومية الكاملة لما ندعـوه الآن "فرميونـات" فيعـود تاريخهـا إلى عـام 1926 وهي من أعمال الفيزيائي الكبير الإيطالي الأصل (الأميركي فيما بعد) إنريكو فرمي Enrico Fermi والفيزيائي العظيم، الذي سبق لنا أن تحدثنا عنـه فيمـا سـبق في أكـثر مـن

مناسبة بول ديراك. إن سلوك الفرميونات الإحصائي يخضع "لإحصاء فرمي – ديراك" الذي يختلف عن "إحصاء بولتزمان" الكلاسيكي المطبق في حالة الجسيمات المتمايزة. أما إحصاء "بوز–اينشتين" المطبق على البوزونات فقد أوجده لمعالجة حالة الفوتونات االفيزيائي الهندي بوز S.N.Bose ثم تبعه بعد ذلك أينشتين عام 1924.

14 - إن هذه النتيجة من الأهمية بحيث أنها تستحق أن نعطي شكلاً آخر لها. لنتخيل أن هناك وضعين فقط للقائس E: للأعلى [↑] ولليمين [→]، وأن القائس P كذلك ليس له سوى وضعين، بزاوية 45° للأعلى نحو اليمين [↗] وبزاوية 45° للأسفل نحو اليمين [↘]. ولنتخيل حالة يكون فيها القائسان E و P في الوضعين [→] و [↗] على الترتيب. عندئذٍ يكون احتمال أن يعطي القائسان النتيجة نفسها هي $\frac{1}{2}(1 + \cos 135°) = 0{,}146$ أي أقل قليلاً من 15 بالمئة. وإن سلسلة طويلة من القياسات المتكررة، في هذا الوضع، هي مثلاً (حيث ترمز Y إلى "نعم" و N إلى "لا"):

E: Y N N Y N Y Y Y N Y Y N N Y N N N N Y Y N . . .
P: N Y Y N N N Y N Y N N Y Y N Y Y N Y N N Y . . .

وهي تعطي 15 بالمئة من حالات الاتفاق. والآن لنفترض أن القياسات على P لاتتأثر بوضع القائس E، وهذا يعني أنه إذا كان وضع القائس E هو [↑] بدلاً من أن يكون [→] فإن سلسلة نتائج القياس على P ستبقى كما كانت – وبما أن الزاوية بين [↑] و [↗] هي الزاوية نفسها كما بين [→] و [↗] فسيكون هناك أيضاً 15 بالمئة من حالات الاتفاق بين قياسات P وقياسات E الجديدة، ولتكن E. ومن ناحية أخرى لو كان وضع القائس E كما في السابق [→] ولكن وضع القائس P اصبح [↘] بدلاً من [↗]، لكانت سلسلة نتائج القياس على E كالسابقة ولكن نتائج القياس على القائس P في وضعه الجديد، وليكن P′، ستكون بحيث يكون هناك 15 بالمئة من حالات الاتفاق مع نتائج E الأصلية، ينتج من هذا أنه لايمكن أن يكون هناك أكثر من 45 بالمئة (15 بالمئة + 15 بالمئة + 15 بالمئة) من حالات الاتفاق بين القياسات على P′ [↘] والقياسات على E′ [↑] بافتراض أن هذين الاتجاهين الأخيرين هما اللذان جرت فيهما القياسات بالفعل. لكن الزاوية بين [↘] و [↑] هي 135° وليست 45°، ولذلك فإن الاحتمال ينبغي أن يكون أكبر بقليل من 85 بالمئة وليس 45 بالمئة. يبين هذا التناقض ان الافتراض القائل أن اختيار القياس على E لايمكن أن يؤثر في نتائج القياس على P (والعكس بالعكس) ليس صحيحاً. إنني مدين لدافيد ميرمن لكونه دلني على هذا المثال. أما المحاكمة الواردة في النص فهي مأخوذة من مقالته (Mermin، 1985).

15 - لقد حصل فريدمان ركلاوزر (Freedman and Clauser، 1972) على نتائج سابقة من تجارب مبنيه على أفكار كان قد اقترحها (Clauser, Horne, Shimony and Holt،

1969) ومازالت هذه التجارب تخضع لمناقشات بسبب أن كفاءة كواشف الفوتونات المستخدمة لاتبلغ أبداً 100 بالمئة، بل أقل من ذلك بكثير مما لايسمح بكشف سوى جزء صغير نسبياً فقط من الفوتونات الصادرة من المنبع. ومع ذلك فإن الاتفاق مع النظرية الكمومية كامل، على الرغم من قلة كفاءة الكواشف، لدرجة أنه يصعب أن نرى كيف يمكن، باستخدام كواشف أفضل، أن **يسوء** الاتفاق مع التجربة فجأة!

16 - يبدو أن نظرية الحقل الكمومية تبدي ملامح لاحسوبية (راجع Komar، 1964).

الكوسمولوجية وسهم الزمن

جريان الزمن

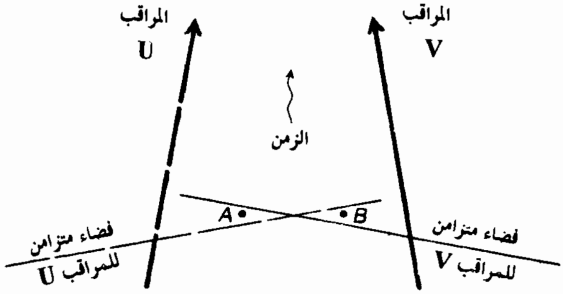
إن القول بأن لدينا شعوراً واعياً، يعني، بصورة أساسية، أننا نحس بالزمن يجري جرياناً مطرداً. إننا *نظن أنفسنا* متحركين أبداً إلى الأمام، من ماضٍ معروف إلى مستقبل غير أكيد. فلقد انقضى الزمن الماضي – وهذا إحساسنا – وليس في يدنا مانستطيعه له ولايمكننا تبديله. إنه، إن صح التعبير، باقٍ "هناك في الخارج". وقد تأتي معرفتنا الحاضرة عنه من وسائل التسجيل لدينا، أي من مخلفات ذاكرتنا ومن استنتاجاتنا منها. ولكن يستحيل أن يتطرق إلينا الشك في *راهنية الماضي الفعلية*، لقد كان شيئاً واحداً وباستطاعته أن يظل هذا الشيء الواحد (الآن). فما حدث قد حدث، وما من شيء مهما كان أمره نستطيع نحن، أو أي كائن آخر، أن يبدل فيه. في حين يبدو المستقبل غير محدد، فقد يثبت في النهاية أنه هذا الشيء، وقد يثبت أنه ذاك الآخر. وقد يكون هذا "الخيار" محدداً تحديداً كاملاً بقوانين الفيزياء، أو قد يكون محدداً تحديداً جزئياً بقراراتنا (أو بقرارات الإله). إلا أن هذا "الخيار" يبدو أنه مازال موجوداً لِيُصنع. إذ يبدو أن هناك مجرد *إمكانات* لما يمكن أن يكونه "واقع" المستقبل فعلاً الذي سيسفر عنه. وبما أننا ندرك مرور الزمن إدراكاً واعياً، لذلك يتحول الجزء الأكثر قرباً من هذا المستقبل العريض، وغير المحدد فيما يبدو، إلى واقع محقق. وينتابنا أحياناً شعور بأننا كنا المؤثرين "المسؤولين" إلى حد ما عن اختيار هذه الإمكانية المعينة للمستقبل التي تحققت فعلاً، والتي أصبحت مقيماً دائماً في "راهنية" الماضي. أما في أغلب الأحيان فنحن نشعر بأننا شاهدون بلا معين – أو ربما مشاهدون يحمدون الله لخلاصهم من المسؤولية – تجاه مجال الماضي المحدد الذي يختم طريقه، لامحالة، نحو مستقبل غير أكيد.

على أن الفيزياء، كما نعلم، تحدثنا عن قصة مختلفة، إنها تنص على أن جميع المعادلات الناجحة متناظرة في الزمن. فهي تصلح للاستعمال في هذا الاتجاه للزمن كما في ذلك الآخر، أو يبدو المستقبل والماضي على قدم المساواة من الوجهة الفيزيائية، إذ تظل جميع المعادلات على حالها فعلاً من دون تبديل إذا عكسنا اتجاه الزمن (أي إذا بدلنا الإحداثي **t** الذي يمثل الزمن بـ **-t**) كما في قوانين نيوتن ومعادلات هاملتون ومعادلات مكسويل ونظرية أينشتين النسبوية العامة ومعادلة ديراك ومعادلة شرودنغر. كما أن الميكانيك الكلاسيكي كله وكذلك الجزء "U" من ميكانيك الكم عكوسان كلياً في الزمن. وهنا يتبادر لنا سؤال:

هل الجزء "R" من ميكانيك الكم عكوس في الزمن فعلاً أم لا؟ هذا سؤال أساسي بالنسبة للحجج التي سأسوقها في الفصل القادم. لكن دعونا الآن نتجنب الإجابة النهائية مستندين في ذلك إلى مايمكن اعتباره "حكمة تقليدية" في هذا الموضوع، أعني أنه يجب اعتبار العملية R، على الرغم من الظواهر الأولية، متناظرة فعلاً في الزمن هي الأخرى. (راجع أهارونوف، برغمان، ليبوفيتش 1964) ويبدو أننا سنحتاج، إذا ماسلمنا بذلك، إلى البحث في غير هذا المكان إن نحن أردنا أن نجد أين تؤكد قوانيننا الفيزيائية وجود تمييز حتمي بين الماضي والمستقبل.

ولكن علينا، قبل أن نتناول هذه القضية، أن ننظر في فارق محير آخر بين إدراكنا للزمان ومايجب أن نعتقد به بحسب ماتقول النظرية الفيزيائية الحديثة. فبحسب النظرية النسبية لايوجد في الحقيقة شيء مثل فكرة "الآن" إطلاقاً. وأقرب معنى لهذا المفهوم هو "فضاء التزامن" عند مراقب في الزمكان، كما هو ممثل في الشكل (5-21 ص 246)، غير أن هذا التزامن يتوقف على ***حركة*** المراقب! لذلك فإن "الآن" عند مراقب قد لاتتفق بالضرورة مع "الآن" عند مراقب آخر[1]. وفيما يتعلق بحادثين A و B في الزمكان، قد يرى مراقب U أن B تنتمي إلى الماضي المثبت، و A تنتمي إلى مستقبل غير أكيد، في حين أنه يمكن أن تنتمي A عند مراقب آخر V، إلى ماض محدد، و B إلى مستقبل غير أكيد! (انظر الشكل 7-1). ولانستطيع أن نؤكد بالمعنى المطلق أن أحد الحادثين A أو B يظل غير مؤكد طالما أن الآخر محدد.

دعونا نتذكر المناقشة في الصفحة 247 شكل 5-22: هناك شخصان يمر كل منهما بالآخر في الشارع، وقد بدأ للتو، بالنسبة لأحدهما، أسطول فضائي رحلته من مجرة أندروميدا، أما بالنسبة للآخر، فلم يكن قد اتُخذ بعد قرار بأن الرحلة ستنطلق فعلاً أم لا. فكيف يمكن أن يظل بعض الشك حيال نتيجة هذا القرار؟ من المُؤكد أنه إذا ***كان*** القرار بالنسبة ***لأحدهما*** قد اتخذ فذلك لأن نتيجته ***لايمكن*** أن تكون موضعاً للشك. إذ إن انطلاقة الاسطول الفضائي أمر محتم. ولكن مامن واحد منهما يمكنه أن ***يدري*** بعد، في واقع الأمر بانطلاقة الاسطول الفضائي. ولن يعرف إلا فيما بعد، حين تكشف الأرصاد المقرابية من الأرض أن الاسطول قد بدأ رحلته فعلاً. وعندئذ يمكن أن يعود إلى لحظة هذا اللقاء غير المنتظر[2] في الشارع. وسيتوصلان إلى أن القرار في تلك اللحظة كان يتوقف بالنسبة لأحدهما على مستقبل غير أكيد في حين أنه يتوقف بالنسبة للآخر على ماضٍ مؤكد. فهل كان ثمة شك في تلك اللحظة بشأن هذا المستقبل؟ أم كان المستقبل بالنسبة ***لكلا الشخصين*** "محدداً" سلفاً؟



الشكل 7-1 : هل يمكن للزمن أن يجري فعلاً؟ فقد يكون الحادث B بالنسبة إلى المراقب U في الماضي "المثبت" بينما لايزال الحادث A بالنسبة له في مستقبل "غير أكيد" والأمور بعكس ذلك تماماً بالنسبة للمراقب V !

لقد بدأ يتضح أنه إذا كان حادث ما محدداً بصورة نهائية، فلابد عندئذٍ أن يكون كامل الزمكان محدداً بالفعل! ولاوجود لمستقبل "غير مؤكد"، أي لابد أن يكون الزمكان ***بكامله*** محدداً من دون أن يكون ثمة مجال للشك إطلاقاً، وهذا ماتبين بالفعل أنه كان استنتاج أينشتين الخاص (انظر بيز Pais 1982، ص 444). أضف إلى هذا عدم وجود زمان يجري إطلاقاً ومالدينا هو مجرد "زمكان" فحسب، كما لاوجود إطلاقاً لمستقبل يتعدى على حدوده بالتدريج، وبلا رحمة، ماضٍ محدد! (وقد يتساءل القارئ: مادور "علاقات الارتياب" في ميكانيك الكم بكل ذلك. إن هذه المسائل التي يثيرها ميكانيك الكم، سنعود إليها فيما بعد في الفصل القادم. أما الآن فخير للقارئ أن يقصر تفكيره على الصور والمفاهيم الكلاسيكية الصرفة)

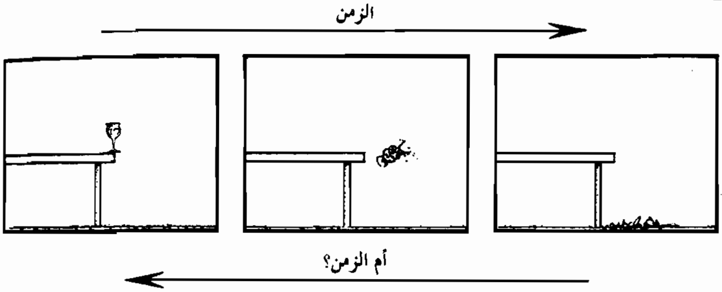
ولاأخفي عنكم أني أجد خلافات حادة بين مايعيه شعورنا بأن ثمة زمناً يجري وبين ماتؤكده نظرياتنا (المذهلة بدقتها) بشأن واقع العالم الفيزيائي. فهذه الخلافات لاجدال بأنها تشير إلى وجود شيء دفين يتعلق بالفيزياء التي يمكن أن نفترض أنها لابد ***كامنة*** في حقيقة الأمر خلف ماتعيه ادراكاتنا الواعية – هذا مع الفرض (كما أعتقد) أنه يمكن فهم السبب الحقيقي في هذه الإدراكات فيما لو ربطناها بفيزياء من نوع مناسب. ويبدو واضحاً على الأقل أنه مهما كانت الفيزياء المستخدمة، فلابد من أن يكون أحد مقوماتها الأساسية غير متناظر زمانياً، بمعنى أنه يجب أن يميز بين الماضي والمستقبل.

ولكن إذا كانت معادلات الفيزياء، كما يبدو، لاتميز بين المستقبل والماضي – وإذا كانت، حتى فكرة الحاضر نفسها لاتتلاءم بصورة مريحة مع النسبية – فعندئذ أين يجب أن نبحث،

بحق السماء، لكي نجد قوانين فيزيائية أكثر اتفاقاً مع مايبدو أننا ندركه من العالم؟ وفي الحقيقة، إن الأمور ليست متضاربة إلى الدرجة التي أبدو لكم أنني عرضتها بها. إذ يضم فهمنا الفيزيائي الراهن مقومات أخرى غير مجرد معادلات تطور الزمن - فبعض هذه المعادلات ينطوي بالفعل على لاتناظرات زمنية. ومن أهمها ذاك الذي يعرف ***بالقانون الثاني في الترموديناميك***. فدعونا نحاول تكوين فكرة عما يعنيه هذا القانون.

تزايد الانطروبية المحتم

لنتصور أن هناك كأس ماء متوازنة عند طرف طاولة، فمن المرجح أنها ستسقط على الأرض فيما لو لكزناها - ولاشك أنها ستتفتت إلى قطع عديدة مبعثرة وسينتشر الماء على رقعة واسعة، أو لربما كانت هناك سجادة تمتصه، أو يسيل بين شقوق البلاط. فكل ماجرى لكأس الماء يتفق بكل أمانة مع قوانين الفيزياء التي تنطبق عليها مواصفات نيوتن. بمعنى أن ذرات الزجاج في الكأس وذرات الماء تحركت كلها وفقاً لقوانين نيوتن (الشكل 7-2). والآن دعونا نعيد هذه الصورة بعكس اتجاه الزمن. فنتيجة لقابلية قلب الزمن في هذه القوانين، يمكن للماء أن يجري أيضاً إلى خارج السجادة ومن شقوق البلاط ليدخل في كأس الماء، التي تكون قد أعادت بناء نفسها بكل همة من القطع العديدة المبعثرة. وعندئذ يقفز هذا التجمع من الأرض إلى ارتفاع الطاولة تماماً ليركن هناك متوازناً عند طرف الطاولة. وهذا كله يتفق اتفاقاً تاماً مع قوانين نيوتن مثلما كان كذلك سقوط الكأس وتفتتها.



الشكل 7-2 : مع أن الزمن قابل للقلب في قوانين الميكانيك، فإن سير الزمن في مشهد كهذا من اليمين إلى اليسار هو شيء لم يحدث أبداً، في حين أن ذلك المشهد من اليسار إلى اليمين هو الشائع المألوف.

وهنا قد يتساءل القارئ: من أين تأتي الطاقة التي ترفع الكأس من الأرض إلى الطاولة. إن ***ذلك*** ليس مشكلة، أو لايمكن أن يكون ثمة مشكلة من هذا النوع، إذ لابد أن ***تذهب*** الطاقة التي اكتسبتها الكأس في حال ***سقوطها*** عن الطاولة إلى مكان ما. والحقيقة أن هذه الطاقة تتحول إلى حرارة، وستتحرك ذرات حطام الكأس والماء والسجادة والبلاط (عند اللحظة التي أعقبت ارتطام الكأس بالأرض) بسرعة أكبر بمقدار ضئيل فحسب عما كانت عليه في

حركتها الدائبة العشوائية، أي أن حطام الكأس والماء والسجادة والبلاط ستكون *أدفأ* بقليل جداً مما كانت عليه من قبل (متجاهلين إمكانية ضياع حرارة بالتبخر - ولكن هذا أيضاً، عكوس مبدئياً). إن هذه الطاقة الحرارية تساوي، بحسب ***حفظ الطاقة***، الطاقة الضائعة من الكأس والماء بسقوطهما عن الطاولة. لذلك يجب أن تكون هذه الكمية الضئيلة من الطاقة الحرارية، كافية لرفع الكأس ثانية إلى الطاولة لاأكثر! وهنا يجدر بنا أن نؤكد أنه يجب أن تكون الطاقة الحرارية مشمولة أيضاً عند الحديث عن حفظ الطاقة. ويسمى قانون حفظ الطاقة، عند أخذ الطاقة الحرارية بالحسبان، ***القانون الأول في الترموديناميك***. ولما كان هذا القانون نتيجة لميكانيك نيوتن فهو عكوس بالنسبة للزمن. فهو لذلك ***لايُلزم*** الكأس والماء بأي طريقة تمنعهما من تجميع نفسيهما ومن أن تمتلئ الكأس بالماء ثم تقفز بمعجزة إلى الطاولة.

ويرجع السبب في أننا لانشاهد حادثاً كهذا إلى الفوضى العارمة التي تعم الحركة "الحرارية" للذرات في حطام الكأس، وفي الماء والسجادة والبلاط، حتى أن معظم الذرات تتحرك في جميع الاتجاهات الخطأ. لذلك فهي تحتاج إلى تنسيق حركتها تنسيقاً دقيقاً لكي يعاد تجميع ائر ذرات الماء فيه من جديد وقذفه برفق إلى سطح الطاولة. وهذا متعذر، بل إن عدم حدوث مثل هذا التنسيق هو أمر أكيد قطعاً! وإذا حدث، فسيكون أعظم رمية حظ على الإطلاق أو أنه نوع من العجائب التي تنسب (عادة) إلى مايشبه السحر ومع ذلك، إن مثل هذه الحركة المتناسقة في الاتجاه الآخر للزمن أمر مألوف، ونحن، بطريقة أو بأخرى، لاننظر إليها إذا حدثت وتحركت الذرات حركة متناسقة، بأنها مجرد مصادفة، هذا بشرط أن تقوم بذلك ***بعد*** حدوث تغير واسع النطاق في الحالة الفيزيائية (وهو هنا تحطم كأس الماء وتبعثرها) وليس ***قبل*** هذا التغيير. ولكن لابد أن تكون حركات الجسيمات في غاية التنسيق فعلاً بعد هذا الحادث، لأن هذه الحركات هي من طبيعةٍ، لو عملنا على قلبها بطريقة قويمة، لكان من الضروري أن تكون حركة كل ذرة بمفردها، وكذلك حصيلة السلوك، هي بالتحديد مايلزم لتجميع الكأس وملئه ورفعه وتوضيعه في شكله البدائي الدقيق.

فالحركة الرفيعة التنسيق لاتكون مقبولة ومألوفة إلا إذا عدت ***نتيجة*** لتغيير واسع النطاق ***لاسبباً*** له. ومع ذلك، تفترض كلمتا "سبب" و "نتيجة"، بطريقة ما، مسألة وجود اللاتناظر الزمني. إذ إننا ألفنا في حديثنا العادي أن نستخدم هاتين الكلمتين للتعبير عن أن السبب يجب أن يسبق النتيجة. ولكن إذا حاولنا أن نفهم الفرق الفيزيائي بين الماضي والمستقبل، فإن علينا أن نكون حذرين جداً لأن لانحشر، عن غير قصد، مشاعرنا اليومية حول الماضي والمستقبل في الدراسة. وهنا علي أن أنبه القارئ إلى أنه من الصعب إلى أبعد الحدود تجنب هذا الحشر، ولكن المحاولة واجبة. وعلينا أن نحاول استخدام كلمات في الفيزياء بطريقة لاتحيز فيها للنتيجة التي تميِّز الماضي من المستقبل. وتبعاً لذلك إذا أتت الظروف مناسبة، فعلينا أن نسمح لأنفسنا بأن نتخذ أسباب الأشياء هي مايأتي في المستقبل والنتائج في الماضي. وليس في المعادلات

الحتمية في الفيزياء الكلاسيكية (أو في عملية U في ميكانيك الكم بالنسبة لهذا الأمر) مايشير إلى تفضيل التطور (أو السير) في اتجاه المستقبل. بل إن هذه المعادلات تصلح بالدرجة نفسها للاستنتاج في اتجاه الماضي. وبها يحدد المستقبلُ الماضي بالطريقة نفسها التي يحدد فيها الماضي المستقبلَ. إذ يمكن أن نسمي بطريقة ما وضعاً خاصاً من أوضاع المنظومة في المستقبل ثم نستخدم هذا الوضع لتقدير كيف كانت تبدو المنظومة في الماضي. فإذا كنا نسمح لأنفسنا أن نرى الماضي سبباً، والمستقبل "نتيجة" عندما نطور معادلات المنظومة في اتجاه المستقبل العادي - فلا شيء يمنعنا عندئذ أن نرى المستقبل سبباً والماضي نتيجة عندما نطبق السير (المحق أيضاً) في تطوير المعادلات في الاتجاه الماضي للزمن.

ومهما يكن من أمر، ثمة شيء آخر مُتضمن في استخدامنا للتعبيرين "سبب" و "نتيجة"، وهذا الشيء ليس في حقيقة الأمر مسألة أي من الحادثين اللذين يتعين حدوثهما هو الذي وقع في الماضي وأيهما في المستقبل. دعونا نتخيل عالماً افتراضياً تسري فيه المعادلات الكلاسيكية نفسها، المتناظرة في الزمن، أي كما هو الأمر في عالمنا الخاص. ولكن سلوك النوع المألوف فيه (أعني تحطم كأس الماء وتبعثر مائه) يتواجد مع تعاقب الأحداث في إتجاه معاكس وكأن الزمن قد عكس، أي لنفرض أنه، إلى جانب أكثر التجارب ألفة، تقوم كؤوس الماء أحياناً بتجميع نفسها من القطع المحطمة وتملأ نفسها بمعجزة من رذاذ الماء المتطاير ثم تثب عائدة إلى الطاولة. ولنفرض أيضاً أنه قد يصادف أن تتخلص عجة مقلية من القلي بأعجوبة، وتعود من ذاتها بيضاً نيئاً ثم تثب أخيراً عائدة إلى قشورها المكسرة التي تتجمع بإتقان وتلتحم على نفسها حول محتواها الذي استرجعته مجدداً. ولنفرض كذلك أن قطعاً من السكر يمكن أن تكوّن نفسها من محلول السكر في القهوة المحلاة، ثم تقفز تلقائياً من الكوب إلى يد إنسان ما. فلو كنا نعيش في عالم تشيع فيه هذه الأشياء، لما عزونا "أسباباً" كهذه قطعاً إلى مصادفات خرقاء غير محتملة يبديها سلوك مترابط صادر عن ذرات فردية. وإنما نعزوه إلى نوع من "الغائية" التي تندفع بها الأشياء المتجمعة من ذاتها أحياناً لكي تنجز تكويناً جهرياً (ماكروسكوبياً) نسعى إليه. وهنا سنقول "انظر، هاهي الذرات تبدأ من جديد لكي تتجمع على هيئة كأس جديدة!". وسنقنع أنفسنا ولاشك بأن الذرات لم تسع هذا المسعى من ذاتها بدقة، إلا لأنه أمر محتم عليها لكي تتكون كأس الماء على الطاولة، وهكذا نكون قد جعلنا تكوّن الكأس على الطاولة "سبباً" وتجمع الذرات العشوائي ظاهرياً على الأرض "نتيجة"، على الرغم من أن هذه "النتيجة" أتت أبكر (زمنياً) من "السبب". وبطريقة مماثلة، إن حركة الذرات المنظمة بدقة في عجة البيض ليست "سبباً" لوثوبها ثم تجمعها في القشرة، بل هي "نتيجة" لما سيحدث في المستقبل، كما أن قطعة السكر لا تجمع نفسها وتقفز من الكوب "لأن" الذرات تتحرك بهذه الدقة الخارقة، بل إن تجمعها راجع إلى أن هناك شخصاً يريد أن يمسك - وإن يكن في المستقبل، أي فيما بعد - بقطعة السكر في يده!

طبعاً، نحن لانشاهد في عالمنا حوادث كهذه - أو إن ما لانشاهده بالأحرى هو ***تواجد*** أشياء من هذا القبيل مع نوع الحوادث العادية. ولو أن كل ماشاهدناه كان يحدث بالطريقة المنحرفة التي ذكرناها، لما كان لدينا مشكلة عندئذ، ولكان باستطاعتنا أن نبادل فحسب بين العبارات "ماض" و "مستقبل"، "قبل" و "بعد" إلخ. في كل وصف، ولأمكن النظر إلى الزمن بأنه يتطور في الاتجاه المعاكس لذاك الذي عرفناه في البدء، ولأمكن وصف هذا العالم تماماً مثلما نصف عالمنا الخاص. وماأتحدث عنه هنا، مع ذلك، هو إمكانية مختلفة - هي تلك التي تتماشى مع التناظر الزمني في معادلات الفيزياء - حيث ***يتواجد*** تبعثر كأس الماء وتجمعه معاً. ففي عالم كهذا لانستطيع أن نسترد وصفنا المألوف للحوادث بمجرد قلب مصطلحاتنا بشأن اتجاه تطور الزمن. بل، إن عالمنا لم يوحد طبعاً ليشبه شيئاً كهذا. ولكن، ترى لِمَ لَمْ يكن كذلك؟ في الحقيقة كنت قد طلبت منك أيها القارئ أن تحاول تخيل عالم كهذا لكي نبدأ بفهم هذه الحقيقة وترى بنفسك كيف كنا سنصف مايحدث فيه. وماأطلبه منك هو أن تسلم معي بأن ما كنا سنصفه في هذا العالم بأنه "أسباب" هو قطعاً التكوينات الجهرية الكبيرة - ككؤوس الماء التامة التكوين مثلاً أو البيض غير المكسور أو قطع السكر التي تمسكها يد إنسان، أما تفصيلات حركات الذرات الفردية وربما حركاتها المترابطة بدقة متناهية فسنصفها بأنها "نتائج" سواء أكانت هذه "الأسباب" في مستقبل "النتائج" أو ماضيها، لايهم.

إن الأسباب في العالم الذي صادف أننا نعيش فيه هي التي يجب عملياً أن تسبق النتائج، فياترى لماذا كان الأمر كذلك؟ أو لعرض الأمور بطريقة أخرى، لماذا بالتحديد لاتحدث الحركات الجزيئية المنسقة إلا ***بعد*** تغير واسع النطاق في الحالة الفيزيائية، وليس ***قبله***؟ سأحتاج للحصول على وصف فيزيائي أفضل لمثل هذه الأمور إلى إدخال مفهوم ***الأنطروبية***. والمقصود بأنطروبية منظومة ما: هو، بعبارة سريعة، قياس ***فوضاها*** الظاهرة (الأمر الذي سأوضحه أكثر قليلاً فيما بعد). وهكذا فإن الكأس المحطمة والماء المتناثر على الأرض هما في حالة أنطروبيتها أعلى من أنطروبية الكأس المتجمعة المملوءة على الطاولة. وللبيض المقلي كذلك أنطروبية أعلى من أنطروبية البيض الطازج غير المكسور، وكذلك أنطروبية القهوة المحلاة أعلى من أنطروبية قطعة السكر غير المنحلة والقهوة غير المحلاة. أو بوجه عام، تبدو حالة الأنطروبية المنخفضة "منظمة تنظيماً خاصاً"، وبصورة ظاهرة. أما حالة الأنطروبية المرتفعة فتبدو أقل تنظيماً من هذا "التنظيم الخاص"

ومن المهم عند الإشارة إلى "خصوصية" الأنطروبية المنخفضة أن نتحقق أننا نحتكم فعلاً إلى خصوصية ***ظاهرة***. لأن حالة الأنطروبية الأعلى في هذه المواقف ***هي*** أيضاً، بالمعنى الأكثر رهافة "منظمة تنظيماً خاصاً" مثلها مثل حالة الأنطروبية الأخفض، وذلك راجع لتناسق حركات الأجزاء الفردية البالغ الدقة. مثال ذلك أن حركات جزيئات الماء (الفردية) التي تسربت بين البلاط بعد تحطم الكأس هي في الحقيقة منظمة تنظيماً خاصاً جداً،

مع أنها حركات عشوائية، إذ إن هذه الحركات محددة إلى درجة أنها لو **قلبت** كلها قلباً صحيحاً، لاستردت حالة الأنطروبية البدائية التي كانت فيها الكأس واقفة مجمعة ومليئة بالماء على الطاولة (ولابد أن تكون الحال كذلك طالما أن جميع هذه الحركات المقلوبة، تنشأ عن قلب اتجاه الزمن – إذ إنه وفقاً لهذا القلب ستجمع الكأس نفسها وتقفز عائدة إلى الطاولة). ولكن هذه الحركة المتناسقة التي تقوم بها جميع جزيئات الماء، ليست نوع "الخصوصية" الذي نشير إليه بأنه حالة الأنطروبية المنخفضة. ذلك لأن الأنطروبية تشير إلى حالة الفوضى ***الظاهرة***. في حين أن النظام الماثل في تناسق حركات الجسيمات الدقيق ليس هو النظام الظاهر، لذلك لايحسب له حساب فيما يتعلق بتخفيض أنطروبية المنظومة. ففي هذا السبيل (سبيل الظاهر)، لايحسب حساب النظام الذي تتبعه جزيئات الماء المتناثرة، ولذلك تكون أنطروبية المنظومة مرتفعة. في حين أن النظام ***الظاهر*** في الماء ***المتجمع*** في الكأس يؤدي إلى قيمة منخفضة الأنطروبية. وهذا يرجع إلى حقيقة أن هناك تركيبات ممكنة ضئيلة العدد نسبياً في الحركات الجسيمية التي تتفق مع التشكيل الظاهر لماء متجمع في كأس مليئة، في حين أن هناك حركات عديدة جداً، أكثر من ذلك، ولكنها تتفق مع التشكيل الظاهر الذي يتخذه الماء الأسخن قليلاً جداً والذي يسيل بين شقوق البلاط.

وينص ***قانون الترموديناميك الثاني على أن أنطروبية المنظومة المعزولة تتزايد مع الزمن (أو تظل ثابتة إذا كانت المنظومة عكوسة)***. والجيد في هذا القانون أننا لانقيم فيه وزناً لكون أنطروبية الحركات الجسيمية المنسقة منخفضة. لأننا لو فعلنا ذلك لوجب أن تظل أنطروبية المنظومة ثابتة دوماً بحسب هذا التعريف. فيجب ألا ينسب مفهوم الأنطروبية إلا إلى الفوضى التي هي بالفعل ظاهرة، لأن المنظومة المعزولة عن بقية الكون هي التي تزداد أنطروبيتها الكلية، بحيث إذا انطلقت المنظومة من حالة تتصف بنوع من التنظيم الظاهر، فإن هذا التنظيم يضعف في أثناء سيرها النظامي، وستتحول كل هذه الصفات الظاهرة الخاصة إلى حركات جسيمات متناسقة (إفرادياً) لافائدة منها. ولربما بدا لنا القانون الثاني أشبه بتحكيم يائس، لأنه يؤكد بأن هناك مبدأ فيزيائياً عاماً صارماً، ينص على أن التنظيم لابد أبداً من أن يتحطم باستمرار. ولكننا سنرى فيما بعد أن هذه النتيجة المتشائمة ليست في محلها كلياً.

ماهي الأنطروبية؟

ولكن ماهي بالتحديد أنطروبية منظومة فيزيائية؟ لقد سبق أن رأينا أنها نوع من القياس الذي يدل على الفوضى الظاهرة. ولكن قد يبدو لكم من استعمالي لعبارات غير دقيقة مثل "ظاهر" و "فوضى" أن مفهوم الأنطروبية هو مفهوم لايمكن أن ندل عليه فعلاً بكمية علمية محددة الوضوح. وثمة جانب آخر للقانون الثاني، يمكن أن يشير إلى شيء من عدم الدقة في

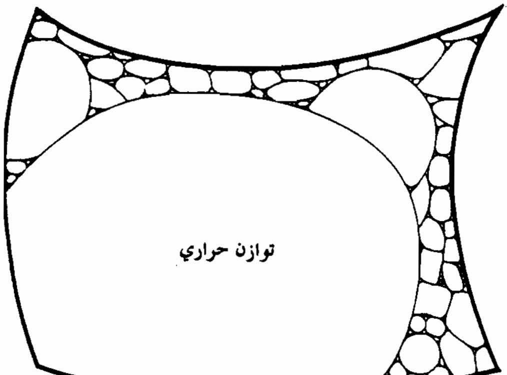
مفهوم الأنطروبية، وهو أن الأنطروبية تزداد عملياً فحسب في المنظومات التي تدعى ***لاعكوسة***، بدلاً من أن تظل ثابتة. فما معنى "لاعكوسة"؟ لنلاحظ أننا لو أدخلنا في حسابنا حركات جميع الجسيمات بالتفصيل، لكانت جميع المنظومات عكوسة! ***أما عملياً*** فعلينا أن نقول إن سقوط الكأس عن الطاولة وتحطمها، وقلي البيض، وانحلال السكر في القهوة هي كلها لاعكوسة، بينما يجب أن يُعد ارتداد عدد صغير من الجسيمات، الواحد منها عن الآخر، عملية عكوسة مثلها في ذلك مثل أوضاع شتى يجري التحكم بها بعناية لكي لاتضيع فيها الطاقة على صورة حرارة. والمقصود أصلاً من التعبير "لاعكوس" هو الحقيقة القائلة أنه لم يكن ممكناً اقتفاء أثر كافة تفاصيل حركات جسيمات المنظومة إفرادياً أو التحكم بها. وتدعى هذه الحركات غير المتحكم فيها "حرارة". وهكذا تبدو لنا اللاعكوسية بأنها مجرد أمر عملي. فنحن، عملياً، لانستطيع استرجاع البيضة بعد قليها. مع أن قوانين الميكانيك لاتمانع في ذلك أبداً. فهل يتوقف مفهومنا عن الأنطروبية على ماهو عملي وماهو غير عملي.

رأينا في الفصل الخامس، أنه ***يمكن*** تعريف مفهوم ***الطاقة*** الفيزيائي تعريفاً رياضياً واضحاً بدلالة الأوضاع الجسيمية والسرع والكتل والقوى مثله في ذلك مثل مفهومي الاندفاع والاندفاع الزاوي. ولكن كيف يمكن أن ينتظر منا القيام بعمل مماثل بالنسبة لمفهوم "الفوضى الظاهرة" الذي نحتاج إليه لصياغة مفهوم الأنطروبية صياغة رياضية دقيقة؟ من المؤكد أن ماهو "ظاهر" بالنسبة لمراقب قد لايكون كذلك لآخر، لذلك نتساءل ألن يتوقف هذا التعريف على الدقة التي سيتمكن بها كل مراقب من إجراء القياسات في المنظومة الخاضعة للبحث؟ فمثلاً "إذا حصل أحد المراقبين على وسائل قياس أفضل ***فإنه سيتمكن*** من الحصول على معلومات أكثر تفصيلاً عن البنية المجهرية للمنظومة مما يمكن لمراقب آخر، كما يمكن "للنظام الخفي" في المنظومة أن يصبح ظاهراً لأحد المراقبين أكثر مما يبدو لمراقب آخر – وتبعاً لذلك سيتحقق الأول من أن الأنطروبية منخفضة أكثر مما سيرى الآخر. أضف إلى ذلك أن الأحكام الجمالية عند مراقبين مختلفين يمكن أن تبدي "النظام" أيضاً في الأمور التي يعدها آخرون "فوضى" لانظاماً، إذ ليس عسيراً أن نتخيل أن أحد الفنانين قد يأخذ بوجهة النظر القائلة أن مجموع قطع الكأس المبعثرة هي مجموعة منظمة بجمالية أكثر بكثير مما كانت عليه الكأس الشنيعة القباحة التي كانت موضوعة على طرف الطاولة. فياترى هل ***تتحول*** الأنطروبية بذلك، بالفعل، إلى الحكم الذي يصدره مراقب فنان وحساس؟

إن مايلفت النظر في مفهوم الأنطروبية، بعد كل ماذكر عن مشاكل النظرة الشخصية فيه، أنه لايزال مفيداً في الشروح العلمية الدقيقة – وهو حقاً كذلك! والسبب في هذه الفائدة هو أن مقدار التبدل من النظام إلى الفوضى في أي منظومة، إذا عُبر عنه بالتفصيل بدلالة أوضاع الجسيمات وسرعها، فإن هذا التبدل يبدو هائلاً بكل معنى الكلمة حتى ليخفي (في جميع الأحوال تقريباً) وبكل وضوح، كافة الاختلافات المعقولة في وجهات النظر حول الحالة

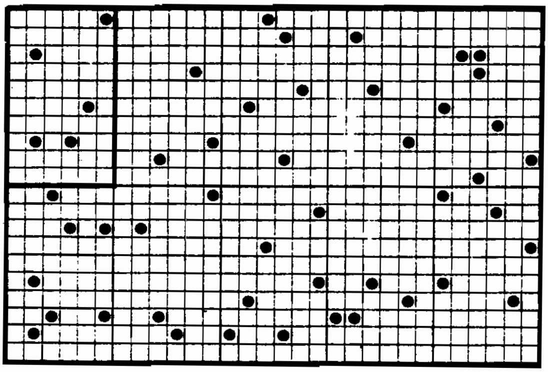
الظاهرة، وحول هل هي حالة نظام ظاهر أم لا على الصعيد الجهري. ونخص بالذكر، أن حكم الفنان أو العالم حول أيهما الأكثر تنظيماً في ترتيبه، أهو الكاس المجمعة أم المبعثرة، يكاد يكون بلا أهمية إطلاقاً بالنسبة لقياس أنطروبيتها. إذ إن المساهم الأكبر في الأنطروبية، الذي يفوق غيره بما لايُحد، هو الحركات الجسيمية العشوائية التي هي عبارة عن ارتفاع درجة الحرارة ارتفاعاً ضئيلاً وتناثر الماء حالما ترتطم كأس الماء بالأرض.

ولكي نصل إلى عرض أكثر دقة لمفهوم الأنطروبية، دعونا نرجع إلى فكرة ***فضاء الطور*** التي أدخلناها في الفصل الخامس. فكما تذكرون إن فضاء طور منظومة ماهو فضاء يكون عادة كثير الأبعاد جداً، وتمثل كل نقطة من نقاطه حالة فيزيائية كاملة بكل تفاصيلها الدقيقة. إذ تعطينا كل نقطة منه ***بمفردها*** إحداثيات الموضع والاندفاع لجميع الجسيمات الإفرادية التي تكوّن المنظومة الفيزيائية التي ندرسها. وهنا يحتاج مفهوم الأنطروبية إلى طريقة لتصنيف جميع الحالات التي تبدو خواصها متطابقة من حيث ***الظاهر*** (أعني الجهرية) كلاً على حدة. الأمر الذي يتطلب منا تقسيم فضاء الطور إلى عدد من الأقسام (الخانات) (انظر الشكل 7-3) حيث تمثل مختلف النقاط المنتمية إلى قسم معين، المنظومات الفيزيائية التي تُعد متطابقة في خواصها الملاحظة من الناحية الجهرية، على الرغم من كونها مختلفة في التفاصيل الدقيقة المتعلقة بتكويناتها الجسيمية وحركاتها. ويُنظر إلى جميع نقاط القسم الواحد، من حيث ماهو ظاهر، بأنها تمثل المنظومة الفيزيائية نفسها. ويقال عن مثل هذا التقسيم الذي طبق على الفضاء الطوري بأنه ***حبحبة خشنة*** لهذا الفضاء



الشكل 7-3 : يمثل هذا الشكل حبحبة خشنة لفضاء طوري إلى مناطق يخص كل منها جميع الحالات التي لاتُميِّز إحداها من الأخرى من حيث المظهر الجهري. ولنلاحظ أن الأنطروبية في حالة من الحالات متناسبة مع لغرتم حجم الفضاء الطوري.

والآن، سيتبين لنا أن بعضاً من هذه الأقسام هو أضخم بكثير جداً من الأقسام الأخرى. فإذا أخذنا مثلاً الفضاء الطوري لغاز موجود في علبة، نجد عندئذ أن معظم الفضاء الطوري يخص الحالات التي يكون فيها الغاز موزعاً في العلبة بانتظام، حيث تتجول جسيماته بطريقة مميزة تؤدي إلى حرارة وضغط منتظمين. ويقال عن نموذج الحركة المميز هذا الذي يمثل أعظم "عشوائية" ممكنة، إن صح التعبير، إنه ***توزيع مكسويلي***، وذلك نسبة إلى جيمس كليرك مكسويل الذي تحدثنا عنه سابقاً. كما يقال عن الغاز حين يكون في هذه الحالة العشوائية إنه في حالة ***توازن حراري***. وهذه حالة يقابلها من نقاط الفضاء الطوري حجم واسع بكل ما في الكلمة من معنى. حيث تصف هذه النقاط جميع الترتيبات التفصيلية المختلفة لأوضاع الجسيمات الفردية التي تتفق مع التوازن الحراري وسرعها. ويؤلف هذا الحجم الواسع واحداً من أقسام الفضاء الطوري، وهو، بلا ريب، أوسعها ويحتل تقريباً كامل الفضاء الطوري. وللمقارنة، دعونا نأخذ إحدى الحالات الأخرى الممكنة للغاز، التي يكون فيها متجمعاً بأكمله في إحدى زوايا العلبة. في هذه الحالة أيضاً سنجد العديد من الحالات التفصيلية الفردية المختلفة التي تصف كل منها الغاز وهو متجمع بالطريقة نفسها في زاوية العلبة، والتي لايمكن التمييز بين إحداها والأخرى من الوجهة الجهرية وهي كلها ممثلة في الفضاء الطوري بنقاط تؤلف قسماً واحداً من هذا الفضاء. إلا أننا سنتبين أن حجم هذا القسم أصغر بكثير من قسم الحالات التي تمثل التوازن الحراري - وهو أصغر بنسبة تقارب $10^{10^{25}}$ فيما لو أخذنا علبة حجمها متر مكعب وتحوي هواء في حالة التوازن في الشروط الجوية العادية من الضغط ودرجة الحرارة، وأخذنا حجم المنطقة في الركن (التي سيتجمع فيها الهواء) سنتيمتراً مكعباً فقط.



الشكل 7-4 : نموذج غاز في علبة: هناك عدد من الكريات الصغيرة. موزع بين عدد أكبر بكثير من الخلايا وقد اخترنا عُشر الخلايا لتكون خلايا *خاصة*. وهي تلك التي حُددت بخط في الزاوية العليا اليسرى.

ولكي نكوّن فكرة مبدئية عن مقدار الفرق بين أحجام الأقسام المختلفة في الفضاء الطوري، دعونا نتخيل وضعاً مبسطاً يتوزع فيه عدد من الكرات على خلايا متعددة. ولنفرض أن كل خلية إما أن تكون فارغة وإما أن تحوي كرة واحدة. أي أن الكرات فرضت لتمثيل جزيئات الغاز، والخلايا لتمثيل الأوضاع المختلفة التي يمكن أن تحتلها الجزيئات في العلبة. والآن دعونا نعزل مجموعة جزئية من الخلايا باعتبارها ركناً *خاصاً*. أي أنها تمثل أوضاع جزيئات الغاز الموجودة في منطقة تحتل زاوية العلبة. ولنفرض الآن، بقصد الدقة والتحديد، أن عُشر الخلايا فقط هي التي تؤلف القسم الخاص - كأن نفرض أن هناك n خلية خاصة، و 9n خلية غير خاصة (انظر الشكل 7-4). ونود أن نوزع m كرة بين هذه الخلايا توزيعاً عشوائياً وأن نجد حظها لأن تتجمع كلها في الخلايا الخاصة. فإذا كان هناك كرة واحدة فقط وعشر خلايا (أي أن لدينا خلية خاصة واحدة)، فإن هذا الحظ (أو الاحتمال) كما يتضح هو عُشْر. وهذا الوضع ذاته يتكرر إذا كان لدينا كرة واحدة و 10n خلية (أي أن هناك n خلية خاصة). ففي حالة "غاز" إذن يتألف من *ذرة واحدة*، يكون حجم القسم الخاص الموافق لحالة الغاز "المتجمع في الزاوية" *عشراً واحداً* من كامل "الفضاء الطوري". ولكن كلما زدنا عدد الكرات، تناقص احتمال عثورها كلها على الطريق إلى الخلايا الخاصة تناقصاً سريعاً جداً. ففي حال وجود كرتين، وعشرين خلية مثلاً* واثنتان منهما خاصتان (n=2 m=2)، يكون حظهما لأن يكونا في الخلايا الخاصة هو 1/190، أو في حال مئة خلية (وعُشرها خلايا خاصة) (m=2 وn=10) يصبح هذا الاحتمال 1/110 أما إذا أصبح عدد الخلايا كبيراً جداً فيصبح الاحتمال 1/100. وهكذا يصبح حجم القسم الخاص بالنسبة لغاز مؤلف من *ذرتين فقط*، *جزءاً من مئة* من كامل حجم "الفضاء الطوري". وفي حال *ثلاث* كرات وثلاثين خلية (n=3 m=3) يصبح الاحتمال 1/4060. ففي حالة عدد كبير جداً من الخلايا (مع بقاء الكرات ثلاث) يصبح الاحتمال 1/1000- إذن في حالة غاز مؤلف من *ثلاث ذرات*، يصبح حجم القسم الخاص *جزءاً من ألف* من حجم "الفضاء الطوري". وفي حال أربع كرات وعدد كبير جداً من الخلايا، يصبح الاحتمال 1/10000، وفي حال خمس كرات وعدد كبير جداً من الخلايا يصبح الاحتمال 1/100000، وهكذا دواليك. ففي حال m كرة وعدد كبير جداً من الخلايا يصبح الاحتمال $1/10^m$، إذن في حال غاز مؤلف من m ذرة يصبح حجم القسم الخاص $1/10^m$من حجم "الفضاء الطوري". (وتظل هذه القاعدة سارية إذا أدخل "الاندفاع" في الحساب).

نستطيع أن نطبق هذه القاعدة على الوضع المذكور أعلاه، وأعنى على حالة غاز فعلي موجود في علبة. ولكننا لن نتخذ المنطقة الخاصة عُشر العلبة كلها، وإنما جزءاً من مليون منها (أي 1/1000000) أو سنتيمتر مكعب من متر مكعب). الأمر الذي يعني أن احتمال تجمع

* وفي الحالة العامة ومهما يكن العددان n و m فإن هذا الإحتمال يساوي:

$${}^{n}C_{m} \div {}^{10n}C_{m} = n!(10n - m)!/(10n)!(n - m)!$$

الذرات في هذا الحجم سيصبح بحسب القاعدة السابقة. $1/(1000000)^m$ أو $1/10^{6m}$ بدلاً من $1/10^m$. ويقدر عدد الذرات كلها، الموجودة في العلبة التي بحجم متر مكعب في حال الهواء العادي بنحو 10^{25} لذلك نأخذ $m=10^{25}$. وبذلك يكون حجم القسم الخاص من فضاء الطور، الذي يمثل حالة تجمع الغاز كله في زاوية العلبة (أي أنه هو احتمال هذه الحالة كما سنرى) هو حجم ضئيل جداً، إذ يساوي:

$$1/10^{6\times10^{25}} = 1/10^{60\,000\,000\,000\,000\,000\,000\,000\,000}$$

من حجم فضاء الطور كله!

يمكن أن تعرّف *أنطروبية* حالة بأنها المقدار (V) الذي يقيس **حجم** القسم الذي يحوي النقطة الممثلة لهذه الحالة في فضاء الطور. ولكن لما كانت الفروق هائلة جداً، كما ذكرنا، بين حجوم هذه الأقسام. لذلك، ربما كان من الأفضل ألا تعتبر الأنطروبية متناسبة مع هذا الحجم. وإنما مع *لغرتمه* أي أن الأنطروبية S هي:

$$S=k \log V$$

فيساعد أخذ اللغرتم على جعل هذه الأعداد تبدو معقولة. فمثلاً لغرتم* 000 000 10 يقرب من 16. أما الكمية k فهي ثابت يدعى ***ثابت بولتزمان***. وقيمته تقرب من 10^{-23} جول لكل درجة كلفن. والسبب الرئيسي في أخذ اللغرتم هنا، هو جعل الأنطروبية كمية ***جمعية*** بالنسبة للمنظومات المستقلة. فإذا كانت لدينا منظومتان فيزيائيتان مستقلتان استقلالاً كاملاً فإن أنطروبية المنظومة المركبة من الإثنتين معاً هو ***مجموع*** أنطروبية الأولى مع أنطروبية الثانية مستقلتين. (وتنتج هذه الخاصة من خاصة جبرية أساسية في الدالة اللغرتمية $\log AB=\log A+\log B$. لأنه إذا كانت حالة المنظومة الأولى ممثلة بنقطة تنتمي إلى القسم الذي حجمه A من فضاء طورها وكانت حالة الثانية تنتمي إلى القسم الذي حجمه B من فضاء طورها بمعزل عن الأولى، فإن حجم الفضاء الطوري للإثنتين معاً هو جداء الحجمين AB. لأن كل إمكانية من إحداهما يمكن أن تأتي بشكل مستقل مع أي إمكانية من الثانية لذلك كانت أنطروبية المنظومة المركبة هي بالفعل مجموع الأنطروبيتين الفرديتين).

وهكذا ستبدو الفروق الهائلة بين حجوم الأقسام في فضاء الطور معقولة أكثر وملطفة بدلالة الأنطروبية. فإذا عدنا مثلاً إلى علبتنا التي سعتها متر مكعب من الغاز، نجد أن أنطروبيتها

---

* يستعمل هنا اللغرتم *الطبيعي*، أعني الذي أساسه ...$e = 2,7182818285$ بدلاً من 10. ولكن ليس لهذا التمييز أهمية كبيرة. إن اللغرتم الطبيعي $x = \log_e n$ لعدد n هو أس القوة التي يجب أن نرفع إليها العدد e لكي يصبح مساوياً n ، أي أنه العدد x الذي هو حل للمعادلة $e^x = n$ (أنظر الحاشية الموجودة في الصفحة 122).

بحسب ماسبق يقرب من $1400JK^{-1}$ (أي $14k\times10^{25}$) مرة من أنطروبية الغاز المنكمش في المنطقة الخاصة التي حجمها سنتيمتر مكعب واحد لأن

$$14 \times 10^{25} \text{ يقرب من } \log_e 10^{6\times10^{25}}$$

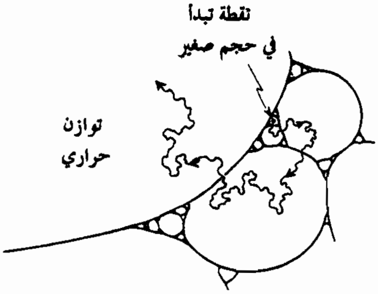
ولإعطاء قيمة الأنطروبية ***الفعلية*** لهذه الأقسام، لابد من أن نولي قليلاً من الاهتمام لمسألة الواحدات التي نختارها (المتر، الجول، الكيلوغرام، درجات كلفن الخ). وهذا أمر قد يكون خارجاً عن مجالنا، إذ ليس للوحدات التي سأختارها أهمية أساسية بالنسبة لقيم الأنطروبية الهائلة فعلاً، التي سأتطرق لها بعد قليل. ومع ذلك دعوني أقول أنني سآخذ، سعياً وراء الدقة (بالنسبة للعارفين) ***الواحدات الطبيعية*** كما تزودنا بها قواعد ميكانيك الكم والتي يتحول فيها ثابت بولتزمان إلى الواحد الصحيح

$$k = 1$$

القانون الثاني في غمرة العمل

لنفرض، الآن أننا بدأنا نلاحظ المنظومة وهي في إحدى حالاتها الخاصة جداً، كأن يكون الغاز كله متجمعاً في إحدى زوايا العلبة. سنرى أن الغاز ينتشر في اللحظة التالية بالتدريج وسيحتل أحجاماً أكبر فأكبر. وبعد برهة سيستقر في وضع التوازن الحراري. فكيف نعبر عن تصورنا لهذا الحادث بدلالة الفضاء الطوري؟ نذكر أن الوصف التفصيلي الكامل لأوضاع جسيمات الغاز وحركاتها يُعطى في كل مرحلة بنقطة واحدة من الفضاء الطوري. وحين يتطور الغاز، تتجول هذه النقطة في فضاء الطور، وتعطي بتجوالها الدقيق وصفاً كاملاً لتاريخ جسيمات الغاز كلها. وهكذا تبدأ النقطة طوافها من منطقة صغيرة جداً – وهي المنطقة التي تمثل مجموعة الحالات الابتدائية الممكنة التي كان الغاز كله محصوراً فيها في زاوية واحدة من زوايا العلبة. وحين يبدأ الغاز انتشاره تدخل النقطة المتحركة (الممثلة له) في حجم أوسع مما كان في فضاء الطور، ويقابل هذا الحجم الحالات التي يمر بها الغاز عند انتشاره داخل العلبة. وهكذا تظل النقطة المماثلة للغاز تدخل في أحجام مناطق أوسع كلما ازداد الغاز انتشاراً، فتجعل كل حجم قديم سبق أن مرت به قزماً بالنسبة لكل حجم جديد تدخله – وبنسبة هائلة بكل معنى الكلمة (انظر الشكل 7–5). وفي كل حالة، ماأن تدخل النقطة حجماً أوسع، حتى يصبح حظها في إيجاد طريق إلى الحجم الأصغر السابق معدوماً من الناحية العملية. وأخيراً تتوه النقطة في أضخم الأقسام حجماً في فضاء الطور – أي في الحجم الموافق لحالة التوازن الحراري. ويحتل هذا الحجم عملياً كامل فضاء الطور. ويمكننا أن نؤكد من الناحية الافتراضية أن النقطة (الممثلة للغاز) في فضاء الطور لن تعثر أبداً في تجوالها الفعلي العشوائي على أي واحد من الحجوم الأصغر في أي زمن معقول. وما أن يبلغ الغاز حالة التوازن الحراري، حتى يبقى في هذه الحالة إلى الأبد. وهكذا نرى أن أنطروبية المنظومة، التي

هي، ليست سوى القياس اللغرتمي لحجم القسم الموافق لحالة الغاز في كل حالة من حالاته، ستميل ميلاً جارفاً نحو التزايد* مع تقدم الزمن.



الشكل 7-5 : كيف يعمل القانون الثاني في الترموديناميك: تدخل النقطة الممثلة للغاز (في فضاء الطور) مع تقدم الزمن في أقسام أحجامها أوسع فأوسع، فتتزايد الأنطروبية عندئذ بالتدريج.

والآن، لابد أنه قد تبين بأن لدينا ***تفسيراً*** للقانون الثاني! لأننا نستطيع أن نفترض بأن النقطة الممثلة للغاز في فضاء الطور لاتتجول في أي طريق مرسوم ومخصص لها، وبأنها إذا بدأت مسيرتها من حجم ضئيل مقابل لأنطروبية ***صغيرة*** في فضاء الطور، فإنه يكاد يكون مؤكداً بالفعل أنها ستتحرك مع تقدم الزمن نحو حجوم أوسع فأوسع في فضاء الطور وتقابل إذن قيماً للأنطروبية متزايدة بالتدريج.

ومهما يكن من أمر فإن ثمة شيئاً غريباً بعض الشيء يحيط بما يبدو أننا استنتجناه في هذا الإثبات، إذ يبدو أننا توصلنا إلى وجود ***لاتناظر زمني***، ذلك أن الأنطروبية ***تتزايد*** في الاتجاه ***الموجب*** للزمن، فهي إذن تتناقص في الاتجاه المعاكس، فمن أين أتى هذا اللاتناظر الزمني؟ فنحن لم ندخل قطعاً، أي قانون فيزيائي غير متناظر زمنياً. ولم تدخل اللاتناظرية الزمنية إلا في كون النقطة قد ***بدأت انطلاقتها*** وهي في حالة خاصة جداً (أعني في حالة أنطروبية منخفضة). ولما كانت المنظومة قد بدأت بهذه الصورة، فقد توقعنا تطورها في اتجاه ***المستقبل***، ووجدنا أن الأنطروبية تزداد. والحقيقة أن تزايد الأنطروبية هذا يتفق مع سلوك المنظومات في عالمنا الفعلي. ولكن كان باستطاعتنا أن نطبق هذا الاثبات ذاته في الاتجاه المعاكس للزمن. كما كان باستطاعتنا أيضاً أن نقول إن المنظومة هي في لحظة ما في حالة أنطروبية منخفضة، ولكن سنتساءل عندئذ ماهو تعاقب الحالات الذي يُرجَّح أكثر بأنه ***سبق*** ذلك.

---

* ليس صحيحاً أن نقطة الفضاء الطوري لن تعثر أبداً ثانية على أحد الأقسام الأصغر، لأننا لو أمهلناها مدة كافية لرأينا حظاً أوفر لدخول النقطة هذه الحجوم الأصغر نسبياً (وهذا ما يجب أن يعرف بمبدأ تراجع بوانكاريه) ولكن مقاييس الزمن ستصبح في جميع الأحوال طويلة فوق مايتصور المرء، فهي تقرب من $10^{10^{26}}$ سنة لكي يصل الغاز كله إلى حجم سنتيمتر مكعب في زاوية العلبة. وهذا زمن أطول بكثير من زمن نشوء الكون. لذلك سأتجاهل هذه الإمكانية فيما يلي من الدراسة لكونها في النهاية عديمة الصلة في حقيقة الأمر بمشكلتنا.

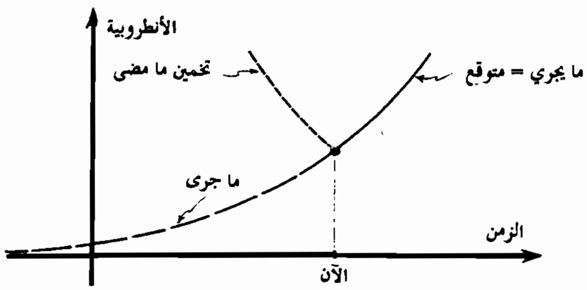
لنحاول البحث في هذه الطريق المعكوسة ولنفرض أن الغاز كله، كما في السابق، في حالة أنطروبية منخفضة وأنه محصور كله في إحدى زوايا العلبة. فالنقطة الممثلة له في فضائه الطوري توجد عندئذ في المنطقة الصغيرة جداً ذاتها التي بدأنا منها سابقاً. والآن دعونا نحاول رسم خطوات *تاريخه السابق*. فإذا تصورنا أن النقطة الممثلة له في فضائه الطوري تتأرجح هنا وهناك بطريقة عشوائية بكل معنى الكلمة كما في السابق، فإننا نتوقع عندئذ، حالما نتتبع خطواتها عائدين في الزمن إلى الوراء، بأنها كانت، كما في الحالة العادية، في حجم أوسع كثيراً من المنطقة الصغيرة السابقة، هو الحجم الذي يصل إليه الغاز عند انتشاره قليلاً في العلبة، ولكن من غير أن يصل إلى حالة التوازن الحراري. ومن هناك سنجدها في أحجام أوسع فأوسع، وكل حجم جديد هو أكبر من كل الأحجام السابقة بكثير. وهكذا يبدو أن ما توصلنا إليه هو أن الغاز، إذا كان في وقت ما مجمعاً في زاوية العلبة، فإن الطريقة الأرجح التي وصل بها إلى هناك هي أنه كان في الأصل في حالة توازن حراري، ثم بدأ بالانكماش على نفسه في حجم صغير خاص في الزاوية. وأن الأنطروبية كانت *تتناقص* مع الزمن باستمرار، إذ لابد أنها بدأت من قيمة التوازن العالية، ثم تناقصت بالتدريج إلى أن وصلت إلى القيمة الصغيرة جداً الموافقة لتجمع الغاز في الزاوية الصغيرة من العلبة.

لاريب في أنه لاشيء من ذلك يحدث أبداً في عالمنا الراهن! فالأنطروبية لاتتناقص أبداً بهذه الطريقة، بل *تتزايد*. ولو عُرف بأن الغاز بأكمله كان متجمعاً في لحظة ما في إحدى زوايا العلبة، لكان الوضع *السابق* لذلك، على أرجح تقدير، هو أن يكون الغاز قد احتُجز في الزاوية بإحكام بواسطة حاجز أزيح بعد ذلك بسرعة. أو ربما كان الغاز هناك محتجزاً في حالة تجمد أو في الحالة السائلة ثم سُخن بسرعة لكي يصبح غازاً. ففي كل من هذين الاحتمالين السابقين كانت الأنطروبية أكثر *انخفاضاً* في حالاتها الابتدائية. أي ظل القانون الثاني مسيطراً، وكانت الأنطروبية تزداد دوماً – أي أنها كانت *متناقصة* فعلاً في الاتجاه المعاكس للزمن. وهكذا يتضح لنا *الآن* أن استدلالنا (السابق) أعطانا إجابة خاطئة تماماً! فقد توصلنا منه إلى أن السبيل الأرجح للوصول إلى حالة غاز متجمع في زاوية العلبة هو البدء من حالة التوازن الحراري، وبعد ذلك يتجمع الغاز، في الوقت الذي تتناقص فيه الأنطروبية باستمرار، في الزاوية، في حين أن هذه الطريق هي، في عالمنا، الراهن *أبعد ماتكون عن* الحدوث. ففي عالمنا، يبدأ الغاز، عندما يكون محتجزاً في الزاوية، من الحالة *الأقل* رجحاناً (أعني أنطروبيتها أخفض) ثم تزداد الأنطروبية باستمرار حتى تصل إلى القيمة التي سنأخذها أخيراً (التوازن الحراري).

وهكذا يبدو إذن أن استدلالنا يكون مناسباً حين يطبق في اتجاه المستقبل لافي اتجاه الماضي. فتوقعنا باتجاه *المستقبل* صحيح وهو أنه متى مابدأ الغاز من الزاوية، فإن أكثر مايرجح حدوثه في المستقبل هو أن يبلغ حالة التوازن الحراري، لاأن يظهر في طريقه فجأة حاجز ما، أو

أن يتجمد فجأة أو يتحول إلى سائل. فمثل هذه البدائل الغريبة هي ما يمثل بالضبط السلوك الذي يخفض الأنطروبية في اتجاه المستقبل، أي أن السلوك الذي يبدو أن استدلالنا، بالاعتماد على الفضاء الطوري، ينفي حدوثه بطريقة صحيحة. أما في اتجاه *الماضي* فإن هذه البدائل "الغريبة" هي مايبدو فعلاً أنها مرجحة الحدوث. ولايبدو لنا عندئذ إطلاقاً أنها غريبة. فالاستدلال المعتمد على فضاء الطور أعطانا إجابة خاطئة كلياً عندما حاولنا تطبيقه في الزمن المعكوس.

ومن الواضح أن هذا الأمر يلقي ظلالاً من الشك على الاستدلال الأصلي[x] فلا يمكن الزعم بعد الآن أننا برهنا على القانون الثاني اعتماداً عليه. لأن مابينه هذا الاستدلال فعلياً هو أنه إذا كانت الأنطروبية منخفضة (كأن يكون الغاز محصوراً في إحدى زوايا علبة)، فإن من المتوقع لها عندئذ، ***إذا لم يكن ثمة عامل آخر يقيد المنظومة***، هو أن تتزايد في ***كلا*** الاتجاهين في الزمن بدءاً من الحالة المعطاة (وذلك بحسب التناظر) (انظر الشكل 7-6) والحقيقة هي أنه إذا لم يثمر هذا الاستدلال في اتجاه الزمن الماضي فذلك ***لوجود*** مثل هذه العوامل المقيدة. وقد كان هناك فعلاً شيء مايقيد المنظومة في الماضي شيء ***أرغم*** الأنطروبية على أن تكون منخفضة في الماضي. فليس في ميل الأنطروبية إلى الارتفاع في المستقبل مايفاجئنا. وحالات الأنطروبية المرتفعة هي بمعنى ما الحالات "الطبيعية" التي لاتحتاج إلى مزيد من التفسير. ولكن حالات الأنطروبية المنخفضة في الماضي تعد معضلة. ترى مالذي ألزم أنطروبية عالمنا على أن تكون منخفضة جداً في الماضي؟ إنها لحقيقة مذهلة أن تشيع في عالمنا الراهن الذي نعيش فيه حالات ذات أنطروبية منخفضة لدرجة غير معقولة – ومع ذلك تبدو لنا هذه الحالات شائعة ومألوفة لدرجة أننا لانميل عادة للنظر إليها بأنها مذهلة. فنحن أنفسنا تكوينات ذات أنطروبية ضئيلة لدرجة لاتصدق. فالاستدلال السابق يبين أننا يجب ألاندهش إذا مابدأنا بحالة ذات أنطروبية منخفضة ووجدنا أن الأنطروبية تزداد في زمن لاحق. ولكن ***مايجب*** أن يدهشنا هو أن تتضاءل الأنطروبية أكثر فأكثر كلما أوغلنا في تفحصنا لها بعيداً في الماضي!



الشكل 7-6 إذا استخدمنا الاستدلال المتبع في الشكل 7-5 عند عكس الاتجاه في الزمن"نخمن" بأن الأنطروبية لابد أن تزداد أيضاً في اتجاه الماضي من قيمتها الحالية. وهذا يتناقض تناقضاً صارخاً مع مايشاهد.

[x] لأن قوانين الطبيعة متناظرة في الزمن، كما ذكر المؤلف.

أصل الأنطروبية المنخفضة في الكون

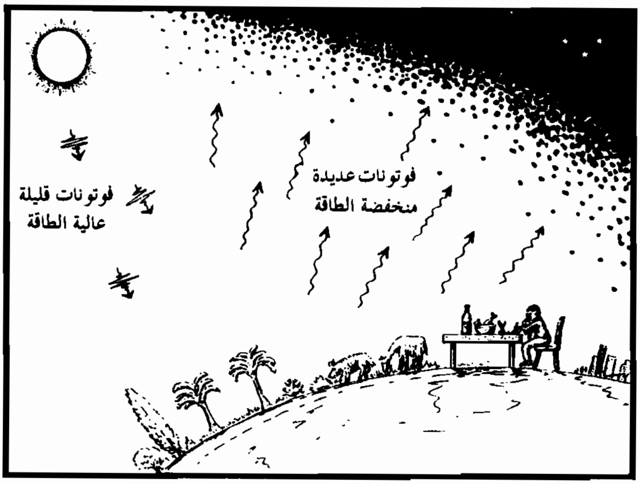
سنحاول أن نفهم من أين أتت هذه الأنطروبية المنخفضة "المذهلة" في عالمنا الراهن الذي نقطنه، ولنبدأ من أنفسنا. فإذا استطعنا أن نفهم من أين أتت أنطروبيتنا المنخفضة، نكون دون شك قادرين على أن نتبين من أين أتت الأنطروبية المنخفضة في الغاز المحصور بواسطة حاجز - أو في كأس الماء الموضوعة على الطاولة، أو في البيضة المعدة للقلي في المقلاة، أو في قطعة السكر المهيأة فوق كوب القهوة لوضعها فيه. هناك في كل حالةٍ شخص أو مجموعة من الأشخاص (أو ربما دجاجة) مسؤول بصورة مباشرة أو غير مباشرة. وهناك جزء صغير من الأنطروبية المنخفضة الموجودة فينا كان قد استفيد منه إلى حد بعيد في إقامة هذه الحالات الأخرى للأنطروبية المنخفضة. كما يمكن أن يكون قد استفيد من عوامل إضافية أخرى. أو ربما استخدمت مفرغة هواء لتجميع الغاز في زاوية العلبة خلف الحاجز. وإذا كانت المفرغة لاتعمل باليد، فمن الممكن أن يكون قد أحرق "زيت أحفوري" (كالنفط مثلاً) لتزويد المفرغة بالطاقة المنخفضة الأنطروبية اللازمة لعملها. أو ربما كانت المفرغة تعمل بالكهرباء، أو تعتمد إلى حد ما على طاقة منخفضة الأنطروبية مخزونة في وقود الأورانيوم الموجود في محطة طاقة نووية. وهذه كلها مصادر أخرى للأنطروبية المنخفضة سأعود إليها فيما بعد، ولكن دعونا نلقي قبل ذلك نظرة فحسب على الأنطروبية المنخفضة الموجودة فينا.

ترى من أين تأتي حقاً أنطروبيتنا المنخفضة؟ هل يأتي التنظيم في جسدنا من الطعام الذي نأكله ومن الأكسجين الذي نتنفسه؟ هذا غالباً مانسمعه يقال: إننا نحصل على ***الطاقة*** من زادنا من الطعام والأكسجين. ولكنْ لدينا شعور واضح بأن هذا حقاً غير صحيح. نحن لاننكر بأن الطعام الذي نستهلكه يتفاعل مع هذا الأكسجين الذي ندخله في أجسادنا، وبأن هذا مايزودنا بالطاقة. غير أن القسم الأكبر من هذه الطاقة يترك أجسامنا ثانية، وغالباً في صورة حرارة. ولكن الطاقة محفوظة، ومحتوى أجسامنا الفعلي من الطاقة يظل ثابتاً إلى حد ما طيلة حياتنا بعد البلوغ، لذلك لاحاجة لأن ***يضاف*** مزيد من الطاقة إلى محتوى أجسامنا منها. ***ولاحاجة*** بنا إلى مزيد من الطاقة في أجسامنا أكثر ***مما*** هو فيها. ومانفعله في حقيقة الأمر عندما نزيد وزننا هو أننا نزيد مالدينا من الطاقة - ولكن هذا العمل لايعد عادة شيئاً مرغوباً فيه! أضف إلى ذلك أنه على قدر ما ننمو منذ طفولتنا يزداد محتوانا من الطاقة ازدياداً كبيراً بنمو أجسادنا، ولكن ليس هذا مايعنيني هنا. وإنما المشكلة هي كيف نحفظ أنفسنا ***أحياء*** طوال حياتنا العادية (ولاسيما بعد البلوغ) ***من دون*** أن نحتاج لأجل ذلك لأن نزيد محتوانا من الطاقة.

على أننا نحتاج قطعاً إلى تعويض الطاقة التي نخسرها باستمرار في صورة حرارة. لذلك كان من الطبيعي أن يخسر الأكثر حيوية بيننا طاقة أكبر عن هذه الطريق، ولابد له من أن يعوضها كلها. لأن الحرارة هي أكثر أنواع الطاقة ***فوضوية***، أي أنها أعلى أشكال الطاقة أنطروبية. فنحن نتناول الطاقة في صورة أنطروبية ***منخفضة*** (طعام وأكسجين) ونطرحها في صورة أنطروبية ***عالية*** (حرارة، ثاني أكسيد الكربون، مفرزات). ولسنا بحاجة إلى كسب الطاقة من محيطنا لأن الطاقة ***محفوظة***. بيد أننا نقاوم باستمرار قانون الترموديناميك الثاني، لأن الأنطروبية ***غير*** محفوظة، ***وتزداد*** طيلة الوقت. ولابد لنا للمحافظة على حياتنا من إبقاء الأنطروبية تنخفض في داخلنا بأن نتغذى من مزيج منخفض الأنطروبية مؤلف من الطعام وأكسجين الجو اللذين نركّبهما في أجسادنا ونطرح الطاقة التي نكون قد كسبناها في صورة أنطروبية مرتفعة. وبهذه الطريقة، نستطيع أن نصون الأنطروبية من الارتفاع في أجسامنا، ونستطيع أن نحافظ على تنظيمنا الداخلي (بل ونزيده) [أنظر شرودنغر **Schrodinger 1967**].

تُرى من أين يأتي هذا المدد ذو الأنطروبية المنخفضة؟ إذا صادف وكان الطعام الذي نأكله من اللحم (أو من الفطر!)، فلا بد أن يكون ***هذا المدد*** قد اعتمد مثلنا على مصدر خارجي آخر منخفض الأنطروبية لكي يزوده ببنية منخفضة الأنطروبية ويحافظ عليها. فهذا ليس حلاً لمشكلة أصل الأنطروبية المنخفضة الخارجي وإنما إبعادها إلى مكان آخر: لذلك دعونا نفترض أننا نحن (أو الحيوان أو الفطر) نستهلك ***نباتات***. والحقيقة أننا جميعاً مدينون بالشكر الجزيل للنباتات الخضراء - إما مباشرة أو لا - لمهارتها، فهي تأخذ من الجو ثاني أكسيد الكربون، وتفصل فيه الأكسجين عن الكربون، ثم تستخدم الكربون في تكوين مادتها الخاصة. وهذه هي عملية ***التركيب الضوئي*** التي تختزل الأنطروبية اختزالاً كبيراً. ثم نحن أنفسنا نستخدم هذا الفصل المنخفض الأنطروبية بأن نقوم بالفعل، بمجرد إعادة تركيب الأكسجين والكربون داخل أجسامنا. ولكن مالذي يجعل النباتات الخضراء قادرة على القيام بهذا السحر المختزِل للأنطروبية؟ إنها تقوم بذلك باستخدام ***أشعة الشمس***. إن الضوء القادم من الشمس، يحمل معه إلى الأرض طاقة بشكلها المنخفض الأنطروبية نسبياً، وبالتحديد في فوتونات الضوء المرئي. فلا تحتفظ الأرض، بما في ذلك سكانها، بهذه الطاقة، بل تعيد إشعاعها كلها (بعد برهة وجيزة) إلى الفضاء. إلا أن الطاقة المرتدة عالية الأنطروبية، وهي مايدعى "الاشعاع الحراري" - الذي يعني فوتونات الأشعة تحت الحمراء. فالأرض (ومعها سكانها) ***لاتكسب*** - خلافاً للانطباع السائد - طاقة من الشمس! وماتفعله هو أنها تأخذ الطاقة بشكلها المنخفض الأنطروبية ثم تردها ***كلها*** ثانية إلى الفضاء، إنما بالصورة المرتفعة الأنطروبية (الشكل 7-7). والحقيقة أن مافعلته الشمس لأجلنا هو أنها زودتنا بمعين هائل من الأنطروبية المنخفضة. ونحن

نستفيد من ذلك (بفضل مهارة النباتات) بأن نحصل أخيراً على جزء ضئيل من هذه الأنطروبية المنخفضة، ثم نحولها إلى البنى المدهشة المعقدة التنظيم التي هي نحن.



الشكل 7-7 : كيف نستفيد من حقيقة أن الشمس بقعة حارة في ظلمة الفضاء الداكنة.

والآن دعونا نلقي نظرة إجمالية تشمل الشمس والأرض معاً لكي نرى ما الذي حدث للطاقة والأنطروبية. فالشمس هي التي تصدر طاقة في صورة فوتونات ضوء مرئي، أما الأرض فتقوم بامتصاص بعضها، ثم تعيد إشعاع هذه الطاقة في صورة فوتونات أشعة تحت الحمراء. والفرق الأساسي بين الضوء المرئي والفوتونات تحت الحمراء هو أن تواتر الأول أعلى من تواتر الثانية. (لنتذكر هنا قانون بلانك E=hυ المعطى في ص 280، فهو يُظهر كيف أن الفوتون الذي تواتره أعلى هو الذي طاقته أكبر). فطاقة كل فوتون في الضوء المرئي أكبر من طاقة كل فوتون في الأشعة تحت الحمراء لذلك يجب أن يكون عدد فوتونات الضوء المرئي الواصلة إلى الأرض ***أقل*** من عدد فوتونات الأشعة تحت الحمراء المغادرة للأرض، بصورة أن الطاقة الواصلة إلى الأرض تعادل تلك التي تغادرها. وهذا يعني أن الطاقة التي ترجعها الأرض إلى الفضاء، تنتشر على عدد من درجات الحرية أعلى بكثير من عدد درجات حرية الطاقة التي تتلقاها من الشمس. لذلك (أي لأن هناك المزيد جداً من درجات الحرية الداخلة في الحساب عندما تُعاد الطاقة ثانية إلى الفضاء) فإن فضاءها الطوري يصبح أوسع كثيراً مما كان عليه، ***وأنطروبيتها*** ترتفع إذن ارتفاعاً هائلاً. لذلك حين تتلقى النباتات الخضراء الطاقة في حالة أنطروبية منخفضة (أي في عدد قليل نسبياً من فوتونات الضوء المرئي) ثم تعيد إشعاعها وهي في حالة أنطروبية

مرتفعة (أي بعدد **كبير** نسبياً من الفوتونات تحت الحمراء)، فإنها تكون بذلك قد استطاعت أن تقتات بهذه الأنطروبية المنخفضة، وأن تزودنا بهذا الفصل الذي نحتاجه بين الأكسجين والكربون.

إذن لم يكن ذلك كله ممكناً لو لم تكن هناك ***بقعة - حارة*** في السماء هي الشمس! فالسماء في حالة اختلال حراري: هناك منطقة صغيرة منها، هي تلك التي تحتلها الشمس، درجة حرارتها أعلى بكثير من المناطق الأخرى، ويزودنا واقعها هذا بمصدر قوي جداً للأنطروبية المنخفضة. فتحصل الأرض على الطاقة من هذه البقعة الحارة بصورة أنطروبية منخفضة (فوتونات قليلة)، ثم تعيد إشعاعها إلى المناطق الباردة بصورة أنطروبية عالية (فوتونات عديدة).

ولكن لِمَ الشمس بقعة حارة هكذا؟ وكيف كانت قادرة على إحداث هذا الاختلال في درجة حرارة السماء، وتوفير حالة من الأنطروبية المنخفضة؟ إن الجواب على ذلك هو أنها تكونت نتيجة الانكماش الثقالي، من غاز (معظمه من الهدروجين) كان في البدء موزعاً توزيعاً منتظماً. وحين انكمش في المراحل الأولى من تكوينه، ارتفعت حرارة الشمس. ثم واصلت انكماشها وارتفاع درجة حرارتها إلى أبعد من ذلك بكثير، وحين بلغت درجة حرارتها وضغطها نقطة معينة وجدت مصدراً آخر للطاقة أبعد شأواً من الانكماش الثقالي، وهو ***التفاعلات الحرارية النووية***، التي تندمج فيها نوى الهيدروجين مكوّنة نوى الهليوم ومطلقة طاقة كبيرة. والحقيقة أن الشمس كانت ستغدو ***أشد*** حرارة واضأل حجماً بكثير مما هي الآن لولا التفاعلات النووية، الأمر الذي كان سيؤدي بها إلى الموت. فهذه التفاعلات هي التي صانت الشمس من ارتفاع حرارتها إلى حد كبير جداً بأن منعتها من الانكماش إلى أكثر من ذلك وجعلتها تستقر على درجة الحرارة التي أصبحت ملائمة لنا، ومكنتها من مواصلة إشعاعها لأمد أطول بكثير مما كان باستطاعتها أن تفعله بوسيلة أخرى.

ولكن يجدر بنا أن نؤكد هنا بأنه على الرغم من الدور الكبير الذي لاجدال فيه الذي تقوم به التفاعلات النووية في تحديد طبيعة الإشعاع الآتي من الشمس وكميته، فإن ***الثقالة*** هي صاحبة الاعتبار الأول. (حقاً أن إمكان حدوث تفاعلات نووية حرارية يساهم مساهمة عالية جداً في انخفاض أنطروبية الشمس، غير أن المشاكل التي تثيرها أنطروبية الاندماج حساسة، وقد تؤدي مناقشة هذا الموضوع بالتفصيل إلى تعقيد الجدل فحسب من دون أن تؤثر في النتيجة النهائية)(3). ولولا الثقالة، لما وجدت الشمس أصلاً! بل إن الشمس تستطيع أن تشع حتى من دون التفاعلات النووية الحرارية - وإن يكن ذلك بطريقة غير ملائمة لنا - لابل كان من الممكن ألا يكون ثمة أشعة شمسية إطلاقاً لولا الثقالة التي كانت ضرورية لضم أجزاء المادة بعضها إلى بعض وإكسابها درجة الحرارة والضغط اللازمين. ولولا الثقالة أيضاً، لكان

كل مايصيبنا هو البرد، ولكان لدينا غاز متناثر بدلاً من الشمس ولما كانت هناك بقعة حارة في السماء.

لم أناقش حتى الآن مصدر الأنطروبية المنخفضة في "المحروقات الأحفورية" الموجودة في الأرض، غير أن الملاحظات هي نفسها من الوجهة الأساسية. إذ يأتي النفط كله، بحسب النظرية السائدة (وكذلك الغاز الطبيعي) الموجود في الأرض من الحياة النباتية قبل التاريخ. ***فللمرة الثانية*** نجد أن النباتات هي المسؤولة عن هذا المورد للأنطروبية المنخفضة. فقد اكتسبت نباتات ماقبل التاريخ أنطروبيتها المنخفضة من الشمس – وهكذا نجد أيضاً أن علينا أن نعود إلى حقيقة أن الذي كوَّن الشمس من الغاز المتناثر هو الفعل الثقالي. وثمة نظرية أخرى مهمة غير مألوفة عن أصل النفط في الأرض، تعزى إلى ت.غولد Thomas Gold وهي تنافس النظرية التقليدية وتقول بأن هناك من النفط في الأرض أكثر بكثير مما يمكن أن يكون قد نتج من نباتات ماقبل التاريخ. إذ يعتقد غولد أن النفط كان قد حصر في باطن الأرض عندما تكونت، وانه راح يتسرب منذ ذلك الحين باستمرار إلى جيوب تحت الأرض[4]. فالنفط وفقاً لنظرية غولد لابد أنه كان قد تركب على كل حال، كما في السابق، بأشعة الشمس، ولكن بعيداً في الفضاء الخارجي حتى قبل أن تتكون الأرض. وفي الحالين تبقى الشمس المتكونة بالثقالة هي المسؤولة.

وماذا عن الطاقة النووية المنخفضة الأنطروبية في الأورانيوم (النظير 235) الذي يستخدم في محطات الطاقة النووية؟ فهذا الأورانيوم لم ينشأ من الشمس (على الرغم من أنه يحتمل جداً أن يكون قد مرّ عبر الشمس في إحدى مراحله) ولكنه أتى من نجم آخر كان قد انفجر انفجار مستعرٍ أعظم منذ آلاف عديدة من ملايين السنين! والواقع أن المادة قد تجمعت من انفجار نجوم ***عديدة*** حين لفظت هذه النجوم تلك المادة في الفضاء نتيجة الانفجار ثم حدث أن تجمع بعضها (نتيجة مداخلة الشمس) فأدت أخيراً إلى العناصر الثقيلة في الأرض، بما فيها كل محتواها من الأورانيوم 235. فكل نواة، هي ومخزونها من الطاقة ذات الأنطروبية المنخفضة، أتت من عمليات نووية عنيفة حدثت في انفجار أحد المستعرات العظمى. وكان الانفجار قد حدث في ***أعقاب كارثة*** الانهيار الثقالي في نجم[5] اصبحت كتلته كبيرة لدرجة أن قوى الضغط الحراري لم تستطع إيقافه عن الانهيار على نفسه. ومابقى نتيجة هذا الانهيار والانفجار الذي أعقبه، هو قلب صغير – على الأرجح في صورة مايعرف ***بنجم نتروني*** (سنتحدث عنه بتفصيل أكثر فيما بعد). ولابد أن النجم كان قد انكمش في البدء تحت تأثير الثقالة من غيمة غاز مبعثرة، وأن الكثير من هذه المادة الأصلية، بما فيها الأورانيوم 235 قد أعيد قذفه إلى الفضاء. ومهما يكن من أمر، فقد كان ثمة ربح وفير في الأنطروبية نَجَم عن الانكماش الثقالي نتيجة لبقاء هذا القلب الذي يتكون من نجم نتروني. فها هي ***الثقالة*** إذن، مرة أخرى، المسؤولة في النهاية –

ولكن في هذه المرة كانت مسؤوليتها أنها سببت (وبعنف أخيراً) تكاثف الغاز المبعثر إلى نجم نتروني.

يبدو أننا وصلنا إلى نتيجة مفادها أن كل انخفاض كبير في الأنطروبية نجده حولنا - والذي يُظهر هذا الجانب المحيّر للقانون الثاني - لابد أن يُعزى إلى حقيقة أنه يمكن تحصيل كمية وافرة من الأنطروبية من الانكماش الثقالي الذي تتحول به الغازات المبعثرة إلى نجوم. ولكن من أين أتت كل هذه الغازات المبعثرة؟ إن *تبعثرها* هذا الذي بدأت به هو الذي يزودنا بهذا المخزون الهائل من الأنطروبية المنخفضة، وسوف نستمر على هذه الحال إلى فترة طويلة مقبلة. والذي أعطانا القانون الثاني هو قدرة الغاز على التكتل نتيجة التأثير الثقالي، وهناك ماهو أكثر، إذ ليس القانون الثاني فحسب هو ماأنتجه هذا التكتل الثقالي، بل ثمة شيء أكثر تحديداً بكثير وأكثر تفصيلاً من مجرد القول: "إن أنطروبية العالم بدأت منخفضة جداً". إذ كان من الممكن إعطاؤنا الأنطروبية وهي منخفضة لهذه الدرجة بطرق مختلفة عديدة *أخرى*، أعني أنه كان من الجائز أن يكون هناك قدر كبير من النظام الظاهر في بدايات الكون، ولكنه مختلف كل الاختلاف عن النظام الذي نبدو فيه الآن (لنتصور أن الكون كان في بدايته على النحو الذي أمكن أن يروق لأفلاطون، أعني أنه كان مجسماً منتظماً ذا اثني عشر وجهاً - أو أي شكل هندسي آخر غير محتمل، فهذا مالابد أن يكون "نظاماً ظاهراً". ولكن ليس من ذلك النوع الذي نتوقع العثور عليه في بدايات الكون *الحقيقي!*) فعلينا إذن أن نفهم من أين أتى كل هذا الغاز المبعثر - ولأجل ذلك، لابد لنا من العودة إلى نظرياتنا الكوسمولوجيّة.

الكوسمولوجية (علم الكون) والانفجار الأعظم

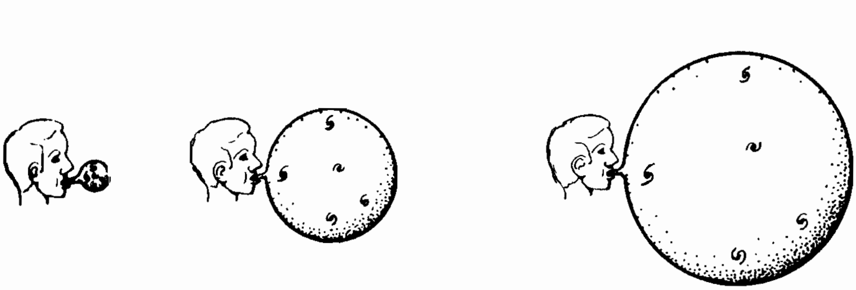
يبدو الكون بحسب المسافات التي نستطيع التحدث عنها الآن نتيجة استخدامنا لمقراباتنا القوية - البصرية والراديوية معاً - أميَل إلى الانتظام على الصعيد الواسع جداً. والأهم من ذلك أنه ***يتوسع***. وكلما نظرنا إلى مدى أبعد بدت المجرات البعيدة (وحتى الكوازارات الأبعد منها) اسرع في التقهقر عنا، فكأن الكون نفسه قد خُلق بانفجار واحد هائل، أي بذلك الحدث الذي يشار له باسم الانفجار الأعظم الذي حدث منذ مايقرب من عشرة آلاف مليون سنة* . ولكن الدعم المؤثر الأقوى لهذا الانتظام، ولوجود نظرية ***الانفجار الأعظم*** حالياً، أتى مما يُعرف ***بإشعاع الخلفية الماثل لإشعاع الجسم الأسود*** وهو إشعاع حراري مؤلف من فوتونات تتجول كيفما اتفق من دون أن يكون لها مصدر مميز، ودرجة حرارتها تقرب من 2,7 درجة مطلقة (2,7 k) أي -270,3 سلزيوس) أو 454,5 فرنهايت تحت الصفر. لذلك قد تبدو حقاً درجة حرارة هذا الإشعاع منخفضة ***جداً*** - وهي كذلك فعلاً - ولكن يظن أنها

* يوجد حالياً نقاش حاد حول قيمة هذا الرقم الذي يراوح بين مايقرب من 6×10^{9} و $1,5\times10^{10}$ سنة. وهذه الأرقام أكبر بكثير من الرقم 10^{9} الذي بدا في أول الأمر مناسباً بعد أرصاد هَبْل الأولية التي بينت قريباً من العام 1930 أن الكون يتوسع.

البقية الباقية من وميض الانفجار الأعظم نفسه! وبما أن الكون قد توسع بهذه الضخامة التي نراها الآن منذ زمن الانفجار، لذلك تناثرت هذه الكرة النارية الابتدائية بنسبة هائلة بكل معنى الكلمة. وكانت درجات الحرارة في أثناء الانفجار الكبير قد تجاوزت كل ارتفاع يمكن أن يحدث في وقتنا الراهن إلا أنها بردت نتيجة التوسع الكوني حتى بلغت تلك القيمة الضئيلة التي هي عليها الآن تلك الخلفية من إشعاع الجسم الأسود. وكان الفيزيائي الفلكي الأميركي، الروسي الأصل، جورج غاموف قد *تنبأ* عام 1948 بوجود هذه الخلفية معتمداً على صورة الانفجار الأعظم التي تعد الآن نظرية قياسية. وكان أول من لاحظ هذه الخلفية (عَرَضاً) هما بنزياس Penzias و ولسون Wilson في عام 1965

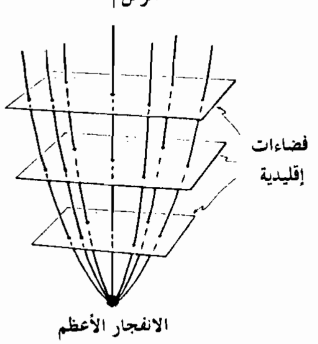
ولابد لي هنا من أن أطرح سؤالاً غالباً ماحيَّر الناس: إذا كانت المجرات البعيدة كلها في الكون تتقهقر عنا، أفلا يعني ذلك أننا نحتل موضعاً مركزياً خاصاً جداً؟ الجواب كلا، لايعني ذلك، بل ستبدو لنا المجرات البعيدة متقهقرة *أينما* كان موضعنا في الكون. إن توسع الكون منتظم على نطاق واسع ولاوجود فيه لموضع خاص مفضَّل على الآخر. وهو *كثيراً* مايشبَّه "بالبالون" حين ينفخ فيه (الشكل 7-8). لأننا إذا رسمنا على البالون بقعاً تمثل مختلف المجرات، واتخذنا من سطح هذا البالون ذي البعدين *ممثلاً* لكامل الكون الفضائي الثلاثي الأبعاد، ثم أخذنا نقطة ما على سطحه، فمن الواضح عندئذ أن كافة النقاط الأخرى ستبدو عند نفخه متقهقرة عن هذه النقطة أينما أخذناها. بمعنى أنه لاوجود لنقطة مفضَّلة على البالون من هذه الوجهة على أية نقطة أخرى. وبطريقة مماثلة، حين نختار نقطة من مجرة لا على التعيين، فإن جميع المجرات الأخرى ستبدو متقهقرة عنها في جميع الاتجاهات على حد سواء.

ويعطينا هذا البالون المتوسع صورة جيدة عن أحد نماذج الكون القياسية الثلاثة التي تدعى نماذج فريدمان Friedman – روبرتسون Robertson – ووكر Walker (باختصار FRW) وبالتحديد نموذج FRW المغلق فضائياً *والموجب الانحناء*. وأما في النموذجين الآخرين (نموذج الانحناء صفر، والانحناء السالب). فيتوسع الكون بالطريقة نفسها. ولكن يكون لدينا، بدلاً من الكون ذي الفضاء المنتهي، الشبيه بما يدل عليه سطح البالون، كون *لانهائي* فيه عدد غير محدود من المجرات.

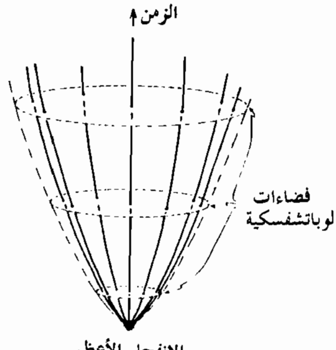


الشكل 7-8 : يمكن أن نشبه توسع الكون بسطح بالون حين ينفخ فيه إذ تتقهقر المجرات كلها الواحدة عن الأخرى.

إن الهندسة الفضائية الأسهل فهما **بين** هذين النموذجين اللانهائيين هي الهندسة الإقليدية، أي التي انحناؤها **صفر**. فلنتخذ مستوياً مسطحاً عادياً ممثلاً للكون المكاني بأكمله. ولنفرض أنه قد رسمت عليه نقاط تمثل المجرات وبما أن الكون يتطور مع الزمن، لذلك تتقهقر هذه المجرات إحداها عن الأخرى بطريقة منتظمة فدعونا نتحدث إذاً عن هذا الفضاء وكأنه ***الزمكان***. فسيكون لدينا تبعاً لذلك مستوٍ اقليدي مختلف لكل "لحظة من الزمن" وسيكون كل مستوٍ من هذه المستويات مركوناً على آخر تحته. وبذلك تتكون لدينا صورة للزمكان بأكمله دفعة واحدة (الشكل 7-9)، وستصبح المجرات ممثلة ***بمنحنيات*** - هي ***خطوط الكون*** لتواريخ المجرات - حيث تتباعد هذه المنحنيات في اتجاه المستقبل أحدها عن الآخر، ولايوجد أيضاً خط كون مفضل لمجرة خاصة.



الشكل 7- 9 : صورة زمكانية لكون يتوسع بمقاطع فضائية إقليدية (مرسومة ببعدين مكانيين).



الشكل 7-10 : صورة زمكانية لكون يتوسع بمقاطع فضائية لوباتشوفسكية (مرسومة ببعدين مكانيين).

أما في نموذج FRW الأخير، أي النموذج ***السالب الانحناء***، فإن الهندسة الفضائية فيه هي هندسة ***لوباتشفسكي اللا*** إقليدية التي سبق وصفها في الفصل الخامس، وتم تمثيلها حسياً

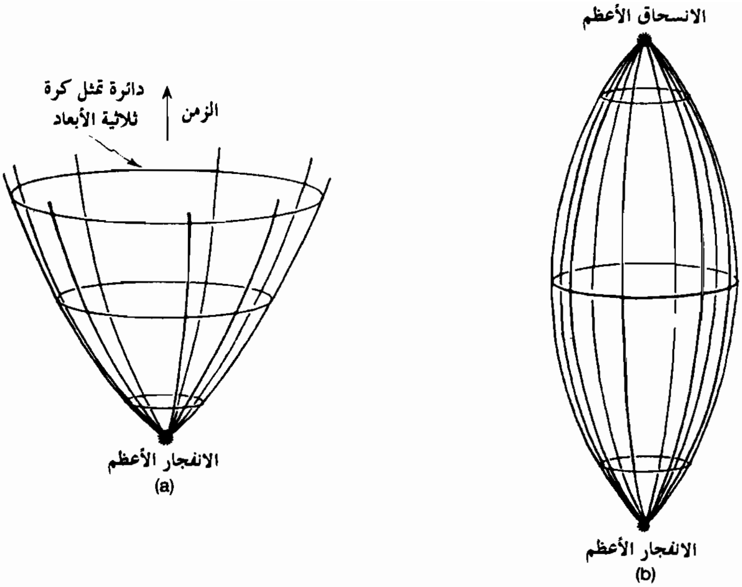
بلوحة إيشر المصورة في الشكل 5-2 (ص 199). ولابد لنا لإعطاء الوصف الزمكاني من أخذ هذه الفضاءات اللوباتشوفسكية لكل "لحظة من الزمن"، ثم من تنضيدهــا كلهـا، بعضهـا فـوق بعض (القمة عند القمة) لكي نعطي صورة كاملة للزمكان (الشكل 7-10)[6]. خطـوط الكـون للمجرات هنا أيضاً هي منحنيات يتباعد أحدها عن الآخـر في اتجاه المسـتقبل ولاتوجـد مجـرة مفضّلة.

كان لابد لنا طبعاً في الوصف السابق من حذف أحد الأبعاد المكانية الثلاثة (كمـا فعلنـا في الفصل 5. أنظر ص239) لإعطاء صورة زمكان ثلاثي الأبعاد، لأن إظهارها أسـهل مما تطلبه منا صورة زمكانية كاملة رباعية الأبعاد. وعلى نحو ذلك، يصعـب علينـا إظهـار الزمكـان الموجـب الانحناء من دون أن نحذف أيضاً بعداً مكانياً آخـر! فلنعمـل ذلـك إذن، لنمثـل الكـون المكـاني المغلق الموجب الانحناء ***بدائرة*** (بعد واحد) بدلاً من الكرة (بعدان) التي مثلناها بسـطح البـالون. فهذه الدائرة يجب أن تكبر، لأن الكون يتوسـع. وهكذا نسـتطيع أن نمثل الزمكـان بـأن نركـن كل واحدة من هذه الدوائر (واحدة لكل لحظـة) علـى الـتي تحتهـا إلى أن نحصـل علـى مخـروط منحنٍ (الشكل 7-11 (a)). إن هذا الكون المغلق بانحناء موجب لايمكـن أن يسـتمر بالتوسـع إلى الأبد بحسـب ماينتج من معادلات نسبية أينشتين العامة. بل سـينهار علـى نفسـه بعـد أن يصل إلى مرحلة التوسـع الأعظمي، وسيصل أخيراً، وبنوع من الانفجار العظيم المعـاكس، إلى الحجم صفر مـن جديـد. (الشـكل 7-11 (b)). وغالبـاً مـاأُطلق علـى هـذا الانفجـار ***الأعظـم*** المعكوس زمنياً اسم الانسـحاق الأعظـم. ولكـن نموذجـي FRW: السـالب الانحنـاء والصفـري الانحناء (اللانهائيين)، لاينهاران هكذا، وإنما يستمران في التوسـع إلى الأبد بـدلاً مـن الوصـول إلى انسـحاق أعظم.

وينطبق قولنا هذا، على الأقل على حالة النسـبية العامة ***القياسـية*** التي يكون ***ثابتهـا الكونـي*** صفراً. أما في حالة قيم الثابت الكوني المناسـبة المغايرة للصفر، فإن من الممكن أن نحصـل علـى نماذج كونية فضاءاتها غير منتهيـة وتنهـار في انسـحاق أعظـم، أو علـى نمـاذج منتهيـة موجبـة الإنحناء وتتوسـع إلى مالانهاية. وقد يعقّـد وجـود ثـابت كونـي مغـاير للصفـر مناقشـتنا بعـض الشـيء، إلا أنه لن يعقّدها بالنسـبة لأغراضنا بأية صورة ملموسة، ولكني سـأتخذه صفراً بغـرض السـهولة* وإن كان معروفاً عنه من الأرصاد عند كتابة هـذه السـطور بأنـه صغـير جـداً وبـأن البيانات تتمشـى مع كونه صفراً (للمزيد من المعرفة عن النمـاذج الكوسمولوجيـة، انظـر ريندلـر Rindler 1977).

---

* أدخل أينشتين الثابت الكوني في عام 1917، ولكنه تراجع عنه في عام 1931، معلقـاً علـى عملـه الأول بأنـه كـان "خطأه الأكبر"!



الشكل 7 - 11 : (a) صورة زمكانية لكون يتوسع، وفيها المقاطع المكانية الكروية (لم يصور فيه المكان إلا ببعد واحد) (b) هذا الكون سينهار أخيراً إلى انسحاق أعظم نهائي).

ولسوء الحظ إن البيانات الموجودة لدينا ليست حسنة بعد لكي تشير بوضوح إلى هذا النموذج الكوني المقترح أو ذاك (كما لاتحدد هل من الممكن أن يكون لوجود ثابت كوني ضئيل تأثير شامل ملموس). ولكن يبدو من النظرة الأولى أنها (أي البيانات) تشير إلى أن الكون سالب الانحناء مكانياً (وهندسته على المدى الواسع جداً هي هندسة لوباتشوفسكي). وأنه سيستمر في التوسع إلى مالانهاية. ويعتمد هذا الحكم أساساً على رصد كمية المادة الحالية التي يبدو أنها موجودة بالشكل الذي يمكن مشاهدته. ومع ذلك، يمكن أن يكون هناك كميات ضخمة من مادة غير مرئية منتشرة عبر الفضاء. وفي هذه الحالة، يمكن أن يكون الكون موجب الانحناء، وأنه يمكن أن ينهار في آخر الأمر بصورة انسحاق أعظم - ولو أن هذا لايصح إلا إذا كان قد مضى على وجود الكون أكثر بكثير من 10^{10} سنة أو نحوها. ولكن لابد لكي يكون هذا الانهيار ممكناً من أن يحوي الفضاء من هذه المادة غير المرئية - الافتراضية المسماة "المادة المظلمة" - نحواً من ثلاثين ضعفاً مما هو موجود من المادة التي يمكن تمييزها مباشرة بواسطة المقراب. والحقيقة أن هناك دليلاً جيداً غير مباشر على أن كمية كبيرة من هذه المادة المظلمة موجودة بالفعل. ولكن هل ثمة ***مايكفي*** منها "***لإغلاق*** الكون" (أو جعله مسطحاً مكانياً) -وجعله ***ينهار***-؟ هذا سؤال يظل مفتوحاً على مصراعيه.

كرة النار الابتدائية

دعونا نعود إلى بحثنا عن أصل قانون الترموديناميك الثاني الذي تعقبنا أصوله إلى أن وصلنا إلى حالة الغاز المبعثر الذي تكثفت منه النجوم. فما هذا الغاز، ومن أين أتى؟ إنه أساساً من الهيدروجين، ولكن يوجد أيضاً 23 في المئة (من كتلته) هيليوم مع كميات صغيرة من مواد أخرى. ولقد أُطلق هذا الغاز بحسب النظرية القياسية نتيجة للانفجار الذي ولّد الكون: الانفجار الأعظم. ولكن يجب أن لانتصور هذا الانفجار انفجاراً عادياً من النوع المألوف الذي تقذف فيه المادة من نقطة مركزية إلى فضاء جاهز سابق في الوجود، لأن الفضاء هنا ***يتكون*** بالانفجار نفسه. ولاتوجد، أو لم تكن توجد نقطة مركزية. وربما كانت أسهل طريقة لتصور الوضع هو حالة الانحناء الموجب. فلنعد إلى الشكل 7–11 ثانية أو البالون المنفوخ في الشكل 7–8 مع ملاحظة أنه لم يكن يوجد قبل الانفجار فضاء فارغ تسكب فيه المادة الناتجة عن الانفجار، بل إن الفضاء نفسه، أعني "سطح البالون" استحدث ونما نتيجة الانفجار. ولابد أن ننوه هنا إلى أننا بغرض الايضاح فحسب، قد استخدمنا في الصور الحسية التي مثلنا فيها حالة الانحناء الموجب فضاء يحيط بالشكل – هو الفضاء الإقليدي الذي يوجد فيه البالون، والفضاء الثلاثي الأبعاد الذي رسم فيه زمكان الشكل 7–11 – ولكن يجب اعتبار هذه الفضاءات ليس لها وجود فيزيائي فعلي. ووجود الفضاء داخل البالون أو خارجه، هو فحسب لكي يساعدنا على اظهار سطح البالون – فهذا السطح ***وحده*** هو الذي يمثل فضاء الكون الفيزيائي. وهكذا أصبح بإمكاننا أن نرى الآن أنه لاوجود لنقطة مركزية تصدر عنها المادة الناتجة عن الانفجار الأعظم. أما النقطة التي تظهر في مركز البالون فهي ليست نقطة من الكون الذي تصوره، ولكننا لانستطيع أن نظهر نموذجنا إلا بهذه الوسيلة. وهكذا تنتشر المادة المتدفقة من الانفجار الكبير انتشاراً منتظماً على الكون ***بأكمله***[x] .

وينطبق هذا القول نفسه على النموذجين القياسيين الآخرين (ولكن قد يكون ايضاحه عندئذ أصعب قليلاً). حيث لم يسبق أبداً أن تجمعت المادة في أية نقطة من الفضاء. فقد كانت دائماً تملأ الفضاء ***بأكمله*** – وحتى منذ بدايته الأولى.

وهذه الصورة تكمن في أساس نظرية ***الانفجار الأعظم الحار*** التي تعرف باسم ***النموذج القياسي***، التي كان الكون بحسبها، بعد لحظات من تكونه، حاراً إلى أبعد الحدود – أو في ***حالة كرة النار الابتدائية***. وقد أُجريت حسابات مفصلة لمعرفة ماطبيعة مكونات هذه الكرة النارية وما نسبها، وكيف تغيرت عندما توسعت الكرة النارية التي كانت الكون بأكمله وبردت. ومما قد يكون مهماً معرفته أن هناك إمكانية لإجراء حسابات موثوقة لوصف حالة الكون التي كانت تختلف كل الاختلاف عن صورته في عصرنا الحالي. إلا أنه لاخلاف على

---

[x] أو بالأحرى مولدّة هذا الكون ومكانه وزمانه.

كل حال حول الفيزياء التي اعتمدت عليها هذه الحسابات، طالما أننا لانتساءل ماالذي جرى قبل مايقرب من أول جزء من عشرة آلاف من الثانية الأولى من نشوءالكون! إذ إن كل مايتعلق بسلوك الكون بدءاً من هذه اللحظة، أي جزء من عشرة آلاف من الثانية الأولى وحتى نهاية الدقائق الثلاث الأولى تقريباً. قد تم وصفه بتفصيل كبير (أنظر وينبرغ 1977)† .

ومن اللافت للنظر أن النظريات الفيزيائية القائمة على أسس متينة والمستمدة من معرفتنا التجريبية عن الكون (الذي أصبحت حالته الآن مختلفة كل الاختلاف عما كانت عليه) هي مناسبة جداً لهذا الوصف[7]. وكانت نتائج هذه الحسابات تدل على أن ما يجب أن يكون قد انتشر بالكون بأكمله انتشاراً منتظماً، هو العديد من الفوتونات (أي الضوء) والالكترونات والبروتونات (مكوّنات الهيدروجين). وبعض جسيمات ألفا (نوى الهيليوم) وأعداد أقل من ذلك من الدوترونات (نوى الدوتريوم، وهو نظير ثقيل للهيدروجين)، وآثار من أنواع النوى الأخرى – وربما معها أيضاً عدد هائل من الجسيمات "اللامرئية" مثل النترينوهات التي يكاد لايدرك وجودها. وبعدما يقرب من 10^8 سنة بعد الانفجار الأعظم، لابد أن تكون هذه المكونات ***المادية*** (لاسيما الإلكترونات والبروتونات) قد اتحدت لتكون الغاز الذي تشكلت منه النجوم (ومعظمه من الهيدروجين).

ولكن لايمكن أن تكون النجوم قد تكونت فجأة، بل لابد أن يكون تكونها قد احتاج لتمدد الغاز بعد ذلك وابترداه إلى حد ما، ثم تكتله في بعض المناطق لكي يتاح للتأثيرات الثقالية أن تتغلب على التمدد الكلي. وإلا كيف تكونت المجرات الحالية وماهي مواضع الشذوذ التي وفر وجودها فرصة لتكوينها؟ وهنا نصل إلى مسألة مستعصية لاتزال موضع خلاف، ولا أود الدخول فيها حالياً. ولكن دعونا نسلّم فحسب بأنه لابد أن يكون قد تكوَّن نوع من الشذوذ في توزع الغاز أتاح بطريقة ما لنوع التجمع الثقالي المناسب أن يبدأ عمله بحيث أمكن للمجرات أن تتكون بما فيها مئات آلاف الملايين من نجومها المكونة لها.

لقد عثرنا إذاً على المصدر الذي أتى منه الغاز المبعثر، إنه أتى من الكرة النارية الأولى التي كانت هي الانفجار الأعظم نفسه. أما توزع هذا الغاز في الفضاء توزعاً يلفت النظر بانتظامه فهو الواقع الذي أعطانا القانون الثاني – وبصورته المفصلة – بعدما أصبحت سيرورة ارتفاع الأنطروبية في التجمع الثقالي متاحة. ولكن مامدى الانتظام في توزيع مادة الكون الحالي؟ لقد أُشرنا سابقاً إلى أن النجوم متجمعة في مجرات، والمجرات نفسها متجمعة في عناقيد، والعناقيد نفسها أيضاً في عناقيد فائقة. بل وهناك مايؤكد بعض التأكيد بأن هذه العناقيد الفائقة متجمعة في تجمعات هائلة يطلق عليها مركبات عناقيد فائقة. لكن يجدر بنا أن نشير مع ذلك إلى أن كل

† اسم الكتاب "الدقائق الثلاث الأولى من عمر الكون" وقد ترجمه إلى العربية محمد وائل الأتاسي عن طبعة معدلة ومزيدة. (من منشورات الدار المتحدة للطباعة والنشر 1991 في دمشق).

هذا الشذوذ وهذه العناقيد هـي "لطخ ضئيلة" بالمقارنة مع الانتظام المدهش في بنية الكون بمجموعه. وكلما توغلنا في الماضي إلى أبعد مانستطيع، وتأملنا في أوسع مايمكننا من الكون، بدا الانتظام بصورة أكثر جلاء. ولنا في الاشعاع الخلفي المماثل لاشعاع الجسم الأسود أكبر دليل مدهش على ذلك. فهو ينبئنا بوجه خاص بأنه حين كان عمر الكون مليون سنة لاغير، وعلى مدى مسافة تنتشر حالياً على مايقرب من 10^{23} كيلومتراً عنا[x] – وهي مسافة يمكن أن تضم 10^{10} من المجرات – كان الكون ومافيه من مادة، منتظماً بتقريب جزء من مئة ألف (أنظر دفيس Davies 1987). فالكون إذن كان برغم بدايته العنيفة، ***منتظماً*** جداً في مراحله الأولى.

وهكذا فإن الكرة النارية الابتدائية هي التي نشرت هذا الغاز بانتظام عبر الفضاء، وهذا ما قادنا إليه بحثنا.

هل يفسر الانفجار الأعظم القانون الثاني؟

ترى هل بلغ بحثنا غايته؟ وهل تفسر حالة الكون في بدايته (أي حالة الإنفجار الأعظم) ذلك الواقع المحير وهو أنطروبية كانت منخفضة جداً بحسب مانستخلصه من قانون الترموديناميك الثاني؟ ولكن يكفي أن نفكر قليلاً لنكتشف علائم المفارقة في هذه الفكرة، وأنها في الواقع لايمكن أن تكون جواباً عن سؤالنا. فالكرة النارية الابتدائية كانت، كما نذكر، حالة ***حرارية*** – أي انتشار غاز حار انتشاراً متوازناً حرارياً. وعبارة "متوازناً حرارياً" تشير – كما نذكر أيضاً – إلى حالة أنطروبية ***عظمى*** (إذ إن هذه هي الحالة التي أطلقنا عليها حالة الأنطروبية العظمى للغاز الموجود في العلبة). ومع ذلك كانت أنطروبية كوننا في حالتها الابتدائية – بمقتضى القانون الثاني – عند نهاية ***صغرى*** وليست عظمى.

ترى ماالخطأ في ذلك؟ هناك جواب "قياسي" يمكن عرضه بسرعة كما يلي:

صحيح أن الكرة النارية كانت فعلاً في بدايتها في حالة توازن حراري، ولكن الكون كان في ذلك الوقت ضئيل الحجم. فكانت الكرة النارية تمثل حالة الأنطروبية العظمى التي يمكن للكون أن يبلغها وهو في هذا الحجم الصغير. ولكن لابد أن هذه الأنطروبية المتاحة، كانت صغيرة جداً بالمقارنة مع ماهو متاح لها أن تبلغه في الحجم الذي نرى الكون فيه الآن. أي أن الأنطروبية العظمى المتاحة كانت تتزايد مع تزايد حجم الكون عند توسعه. ولكن أنطروبية الكون الراهنة كانت تتلكأ ساعية خلفها، وتعمل دائماً على بلوغ هذه النهاية العظمى المتاحة[†] مما يجعل القانون الثاني يظل يعمل عمله.

---

[x] وهي استطاعة المراصد الراديوية الحالية.

[†] أي ما إن يقترب الكون من التوازن الحراري (أي الأنطروبية العظمى) حتى يكون قد توسع حجمه وكبرت معه أنطروبيته العظمى فتعود الأنطروبية الراهنة للحاق بها من جديد وهكذا ...

ولكن يكفي أن نفكر قليلاً لنجد طبعاً أن هذا التفسير لايمكن أن يكون صحيحاً، لأنه لو كان كذلك، لأمكن تطبيق هذه الحجة ثانية على أحسن وجه في الاتجاه *المعاكس* للزمن في حالة نموذج الكون (المغلق فضائياً) الذي يعود في النهاية إلى الانهيار في انسحاق أعظم. ولكان هناك أيضاً حد أعلى صغير لقيم الأنطروبية الممكنة عندما سيصبح حجم الكون ضئيلاً في النهاية. فالشرط نفسه الذي استخدم في اعطاء أنطروبية منخفضة في مراحل الكون المبكرة جداً، لابد أن يطبق ثانية في المراحل الأخيرة من الكون المنكمش. ولكن شرط الأنطروبية المنخفضة في بداية الزمن هو الذي أعطانا القانون الثاني الذي ينص على أن أنطروبية الكون تتزايد مع الزمن فلو طبق شرط الأنطروبية المنخفضة هذا نفسه على "نهاية الزمن" لوجدنا عندئذ أن في ذلك تناقضاً كبيراً مع قانون الترموديناميك الثاني!

ولكن من الجائز طبعاً أن تكون القضية غير ذلك. وأن عالمنا الراهن لن ينهار ثانية أبداً بهذه الطريقة. فلربما كنا نعيش في عالم انحناؤه الفضائي الكلي صفر (الحالة الاقليدية) أو سالب (الحالة اللوباتشوفسكية). أو ربما كنا نعيش في كون (موجب الانحناء) يسير نحو الانهيار فعلاً، إلا أن انهياره سيحدث في زمن بعيد جداً لدرجة أنه لايمكن أن يظهر فيه أي خروج عن القانون الثاني في عصرنا الراهن – هذا على الرغم من أن أنطروبية الكون *بأكملها* يمكن أخيراً، من وجهة النظر هذه، أن تغير اتجاهها وتتناقص إلى قيمة صغرى – فمن الجائز إذاً أن يختل القانون الثاني كما نفهمه حالياً اختلالاً هائلاً.

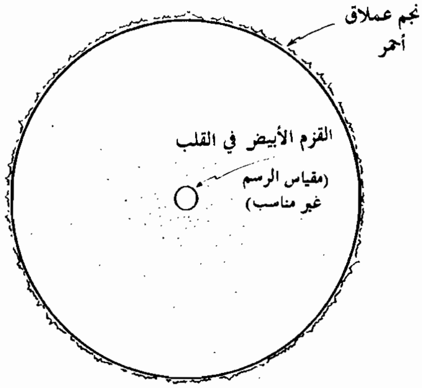
على أن هناك أسباباً قوية في الواقع تدفعنا إلى الشك بأن من الممكن انتكاس الأنطروبية على أعقابها في كون منهار. ومن أقوى هذه الأشياء ماله علاقة بتلك الأشياء الغامضة التي تدعى *الثقوب السوداء*، والتي يمكن أن نرى فيها مثالاً مصغراً عن كون منهار. فلو كانت الأنطروبية تنقلب فعلاً إلى التناقص في الكون المنهار، لحدث قطعاً خرق هائل في القانون الثاني في جوار الثقب الأسود. إلا أن كل شيء يدعونا إلى الاعتقاد بأن القانون الثاني يبقى مقنعاً بقوة فيما يتصل بالثقوب السوداء. لذلك كان لابد لنا من دراسة هذه الأشياء الغريبة بشيء من التفصيل، إذ أن نظريتها ستمدنا بمادة أساسية لدراسة الأنطروبية.

الثقوب السوداء

دعونا نرى أولاً ماالذي نستطيع أن نعرفه من دراستنا النظرية عن مصير شمسنا النهائي. لقد مضى على وجودها خمسة آلاف مليون سنة ، وفي غضون خمسة إلى ستة آلاف مليون سنة أخرى، سيبدأ حجمها بالتوسع والامتداد بلا هوادة إلى أن يصل سطحها إلى مايقرب من مدار الأرض وعندئذ ستصبح نجماً من النوع الذي يعرف باسم *العملاق الأحمر* الذي لدينا منه في السماء أمثلة معروفة أشهرها الدبران في كوكبة الدب الأكبر وبيت الجوزاء في الجوزاء.

وسيكون لها في قلبها تماماً وطيلة توسع سطحها ، تكتل مادي صغير الحجم فائق الكثافه ينمو باستمرار هو الذي سيتخذ شكل نجم *قزم أبيض* (الشكل 7-12).

وإذا نظرنا إلى النجوم الأقزام البيضاء لذاتها، نجد أنها نجوم حقيقية تتركز مادتها في كثافة هائلة، قد يصل وزن كرة الطاولة من مادتها إلى مئات الأطنان! ويشاهد منها في السماء عدد كبير، وربما كانت نسبتها بين النجوم اللامعة في مجرتنا درب التبانه عشرة في المئة. وأشهرها هو رفيق الشعرى اليمانية الذي وضعت كثافته بارتفاعها الهائل معضلة حقيقية أمام فلكيي الشطر الأول من هذا القرن. إلا أن هذا النجم نفسه أصبح فيما بعد تأكيدا رائعا للنظرية الفيزيائية (قدمه أولاً ر.هـ فاولر R.H.Fowler حوالي العام 1926) - وبمقتضاه، يمكن أن يكون لبعض النجوم فعلاً مثل هذه الكثافة المرتفعه، وأنها يمكن أن تصمد على هذا الوضع نتيجة "ضغط الانحطاط الإلكتروني" بمعنى أن مايمنع النجم من الإنهيار ثقالياً إلى الداخل هو خضوع الإلكترونات لمبدأ باولي في ميكانيك الكم المعروف بمبدأ الاستبعاد (ص 331).



الشكل 7-12 : نجم عملاق أحمر وفي قلبه قزم أبيض.

ويحوي كل نجم عملاق أحمر في قلبه قزماً ابيض يظل يجمع باستمرار مادة من جسم النجم العملاق الأساسي، إلى أن يستهلك أخيراً هذا القلب الطفيلي مادة العملاق الأحمر كلها ويتحول إلى قزمٍ أبيض حقيقي يقرب حجمه من حجم الأرض. ويُتوقع لشمسنا ألا تظل على هيئة عملاق أحمر إلا لمدة لاتتجاوز عدة آلاف من ملايين السنين، ثم تستمر بعدها في شكلها

المرئي الأخير على صورة قزم أبيض "أشبه بجذوة تخمد ببطء خمود الموت* في بعض آلاف من ملايين السنين" لتغرق في نهاية الأمرفي ظلام دامس على صورة ***قزم أسود*** غير مرئي.

ولن يشارك الشمس في هذا المصير إلا بعض النجوم. في حين أن بعضها الآخر ينتهي بنهاية أشد عنفاً ويتقرر مصيره فيما يُعرف باسم الحد الأعلى التشاندرا سيخاري، وهو أعظم قيمة يمكن أن تبلغ كتلة قزم أبيض. إذ دلت الحسابات التي قام بها س.تشاندرا سيخار Subtahmanyan Chandrasekhar عام 1929 على أن القزم الأبيض لايمكن أن يكون له وجود إذا كانت كتلته أكبر من كتلة الشمس بمرة وخُمس (وحين قام هذا الهندي الشاب بحسابه كان مسافراً على ظهر أحد المراكب من الهند إلى انجلترا ليتابع هناك دراساته العليا). ثم أعاد هذا الحساب أيضاً في عام 1930 وبمعزل عن الأول الروسي ليف لانداو. ولكن القيمة الحالية المدققة إلى حد ما لحد تشاندرا سيخار هي تقريباً:

$$1,4\,M_{\odot}$$

حيث: $M_{\odot}$ هي كتلة الشمس. أي أن $M_{\odot}$ هي ***كتلة شمسية*** واحدة.

وهنا نلاحظ أن حد تشاندرا سيخار ليس أكبر من كتلة الشمس بكثير في حين أننا نعرف نجوماً عادية كثيرة كتلتها أكبر بكثير من هذه القيمة. فما الذي يمكن أن يصير إليه نجم كهذا كتلته $2M_{\odot}$ مثلاً؟ هنا أيضاً لابد تبعاً للنظرية السائدة أن يتمدد هذا النجم ليصبح عملاقاً أحمر، أما القزم الأبيض في قلبه فستزداد كتلته بالتدريج كما في السابق. إلا أنه حين يبلغ مرحلة حرجة، سيصل إلى حد تشاندرا سيخار، ولن يكفي مبدأ باولي في الاستبعاد ليحفظه من الضغوط الثقالية الهائلة المتولدة من تعاظم الكتلة[8]. وهنا، عند هذه النقطة أو قريباً منها، سينهار القلب إلى الداخل إنهياراً مروعاً، وستبلغ درجات الحرارة والضغوط المتزايدة حدوداً هائلة مما يفسح المجال لحدوث بعض التفاعلات النووية التي تطلق من القلب كمية هائلة من الطاقة في صورة نترينوهات ترفع درجة حرارة المناطق الخارجية من النجم (التي كانت قد انهارت إلى الداخل) الأمر الذي يعقبه انفجار مذهل ويصبح النجم معه مستعراً أعظم!

ولكن ماالذي يحدث للقلب المستمر في الانهيار؟ إنه يبلغ بحسب ماتفيدنا به النظرية درجات عالية جداً من الكثافة تفوق حتى تلك المخيفة التي سبق أن بلغها باطن القزم الأبيض. وعندئذ يمكن للقلب أن يستقر على حالة ***نجم نتروني*** (ص382) حيث تبقى ***النترونات*** منفصلة بعضها عن بعض نتيجة ***ضغطها الانحطاطي*** بحسب مبدأ باولي في الاستبعاد المطبق عليها. أما كثافة القلب فتبلغ حداً يتكون معه وزن المادة النترونية التي بحجم كرة الطاولة بقدر

* إن القزم في واقع الأمر سيتوهج باحمرار ضعيف في مراحله الأخيرة مثل نجم أحمر-ولكن مايسمى عادةً "قزماً أحمر" هو نجم تختلف طبيعته عن ذلك كل الاختلاف.

وزن الكويكب هرمز (أو ربما بوزن ديموس قمر المريخ). وهذه الكثافة هي من رتبة تلك التي نعثر عليها في نواة الذرة نفسها! (فالنجم النتروني أشبه بنواة ذرية هائلة، قد يبلغ قطرها بضع عشرات الكيلومترات، ولكنه لايعد شيئاً مع ذلك بالمقارنة مع مقاييس النجوم) ولكن يوجد في هذه الحالة (النجم النتروني) حد جديد شبيه بحد تشاندرا سيخار (يسمى حد لانداو - أوينهايمر - فولكوف) تقدر قيمته المدققة حالياً. بتقدير مبدئي جداً:

$2,5\ M_{\odot}$

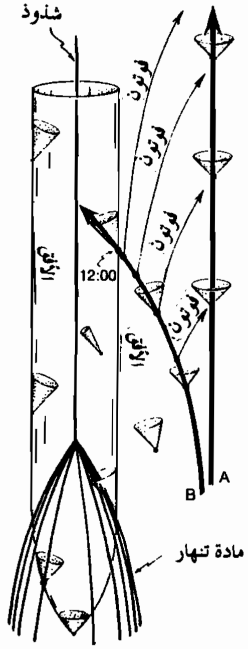
وهو الحد الذي لايمكن للنجم النتروني، إذا ماتجاوزه، أن يحفظ نفسه من بعده

ترى مالذي يحدث لهذا القلب المنهار إذا كانت كتلة النجم الأصلي كبيرة كبراً كافياً تتجاوز فيه هذا الحد؟ هناك نجوم عديدة معروفة، تتراوح كتلتها بين $10\ M_{\odot}$ و $100\ M_{\odot}$ مثلاً. وفي هذه الحالة يبدو من المستبعد جداً أن تتخلص هذه النجوم من كل هذه الكتلة الكبيرة لتصبح كتلة القلب منها بالضرورة دون حد النجم النتروني الأعلى، لذلك فإن نهايتها البديلة المتوقعة هي ***ثقوب سوداء***.

ولكن ماهو الثقب الأسود؟ إنه منطقة من الفضاء - أو من المكان - الزمان - أصبح الحقل الثقالي في داخلها من الشدة بحيث لايمكن للضوء أن يفلت منه. فإذا تذكرنا أن من النتائج المترتبة على مبدأ النسبية أن سرعة الضوء هي السرعة القصوى، أي لايمكن لأي شيء مادي أو أية إشارة أن تتجاوز سرعة الضوء المحلية (ص 240 و 257) عندئذ نفهم لماذا لايمكن أن يفلت ***أي شيء*** من الثقب الأسود، طالما أن الضوء لايفلت منه

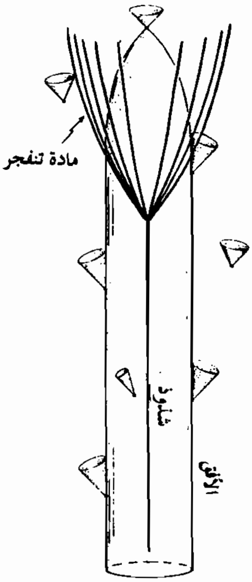
وربما كان مفهوم ***سرعة الافلات*** مألوفاً لدى القارئ، ومع ذلك تُعرَّف هذه السرعة بأنها هي السرعة التي يجب أن ***يبلغها*** جسم ما لكي يفلت من جرم هائل الكتلة. فإذا فرضنا مثلاً أن هذا الجرم هوالأرض، عندئذ تكون سرعة الافلات قريبة من 40000 كيلومتر في الساعة أي مايقرب من 25000 ميل في الساعة. فإذا أطلق حجر من سطح الأرض، في أي اتجاه يبعده عنها وبسرعة تفوق هذه السرعة فإن هذا الحجر سيفلت من الأرض كلياً، (مع افتراض أننا نستطيع تجاهل تأثيرات مقاومة الهواء). أما إذا قذف الحجر بسرعة أقل من ذلك فإنه سيعود ويسقط على الأرض (لذلك، ***ليس*** صحيحاً أن كل شيء يرتفع سيسقط. لأن الجسم لايعود إلا إذا قذف بسرعة ***أقل*** من سرعة الافلات!). وسرعة الافلات بالنسبة للمشتري هي 220000 كيلومتر في الثانية أو حوالي 140000 ميل في الساعة، وهي بالنسبة للشمس 2200000 كيلومتر في الساعة أو حوالي 1400000 في الساعة. والآن، دعونا نتخيل أن كتلة الشمس قد تركزت في كرة قطرها هو ***ربع*** قطر الشمس الحالي، عندئذ سنجد أن سرعة الافلات منها قد أصبحت ***ضعف*** ماهي عليه الآن. ولو أن الشمس تركزت أكثر من ذلك، ولنقل في كرة قطرها ***جزء من مئة*** من قطرها الحالي، لازدادت سرعة الافلات منها إلى ***عشرة أمثالها***. وهكذا نستطيع أن

نتخيل الآن أنه إذا كانت كتلة الجسم كبيرة مركّـزة بما يكفي، فإن مـن الممكـن أن تتجـاوز سـرعة الإفلات منه سرعة الضوء، ويكون لدينا عندئذ ثقب أسود[9]



الشكل 7-13

مخطط زمكاني يصف الانهيار إلى الجسم الأسود، ولقد أشير إلى نصف قطر شفارتز تشايلد بكلمة "أفق".



الشكل 7-14

شكل يمثل زمكاناً إفتراضياً: ثقب أبيض يتفجر أخيراً إلى مادة (أي يمثل انعكاس الزمن في زمكان الشكل 7-13)

ولقد رسمت في الشكل 7-13 مخططاً زمكانياً أصـف فيـه انهيـار جسـم يكـوّن ثقبـاً أسـود (ولقد فرضت فيه أن الانهيار يجري بطريقة يحافظ فيها تقريبـاً علـى التنـاظر الكـروي إلى الحـد المعقول وحيث حذفت أحد أبعاد المكان). ولقد رسمت فيه أيضاً مخاريط الضوء التي تشير كمـا نذكر في دراستنا للنسبية العامة في الفصل الخامس (أنظر ص 254) إلى الحـدود المطلقـة الـتي تبلغها الأشـياء المادية والإشـارات. ولنلاحظ أن المخـاريط تبـدأ بـالميلان إلى الداخـل وفي اتجـاه المركز، وأن ميلانها سيقترب من أقصاه أكثر فأكثر كلما كانت أقرب إلى المركز.

ثمة مسافة حرجة تبدأ من المركز وتسـمى ***نصف قطر تشفارتزتشايلد*** Schwarzchild وهي مسافة تصبح عندها الحدود الخارجية (أي المولدات الخارجية) للمخاريط ***شاقولية*** في المخطـط. ويمكن للضوء الذي يجب أن يتبع مخاريط الضوء) أن يحوم عند هذه المسافة فوق الجسم المنهـار. إذ إن كل مايمكن للضوء أن يحشده من السرعة المتجهة إلى الخارج لايكفـي إلا بـالجهد الجهيـد

لأن يعادل الجذب الثقالي الهائل. ويسمى ثلاثي السطوح في الزمكان، الذي يرسمه هذا الضوء المحوم (أعني تاريخ الضوء الكامل) عند الحدود أي عند نهاية نصف قطر تشفارتزتشايلد/*أفق الحدث (المطلق)* للثقب الأسود. وكل شيء يسوقه قدره إلى داخل أفق الحدث لن يستطيع الافلات أو حتى الاتصال بالعالم الخارجي، هذا مانستطيع أن نتبينه من ميلان المخاريط ومن حقيقة أساسية هي أن جميع الحركات والاشارات ملزمة بالانتشار داخل هذه المخاريط (أو عليها). وفي حالة ثقب أسود متكون من انهيار نجم يعادل عدة مرات من كتلة الشمس، لايتجاوز نصف قطر الأفق أكثر من بضعة كيلومترات. وأما الثقوب السوداء الأكبر بكثير من ذلك فيتوقع وجودها في مراكز المجرات. وهناك احتمال كبير جداً أن تكون مجرتنا درب التبانة تحتوي على ثقب أسود يساوي نحو مليون كتلة شمسية. وعندئذ يبلغ نصف قطره بضعة ملايين الكيلومترات .

إن الجسم المادي الفعلي الذي ينهار ليشكل ثقباً أسود، سينتهي أمره كلياً داخل الأفق وسيصبح غير قادر إطلاقاً على الاتصال بالعالم الخارجي. وسوف نلقي بعد قليل نظرة على المصير المحتمل لهذا الجسم. ومايهمنا الآن هو فقط هندسة الزمكان التي تتولد بانهيار الجسم – وهي هندسة زمكانية تترتب عليها نتائج عميقة مثيرة.

دعونا نتخيل أن ملاحاً كونياً جريئاً (أو متهوراً) B قد قرر السفر إلى داخل ثقب أسود كبير، في حين أن صاحبه الخجول (أو الحذر؟) A فضّل البقاء بأمان خارج الأفق. ولنفرض أن A قد سعى لأن يبقى B تحت نظره أطول مدة ممكنة. ترى ماالذي يراه A؟ يمكننا أن نتأكد من الشكل 7–13 أن الجزء الواقع *داخل* الأفق من تاريخ B (أي من خط B الكوني) لايمكن أن يراه A أبداً. في حين أن الجزء الواقع *خارج* الأفق سيكون بإمكان A أن يراه – ومع ذلك يمكن لـ A أن يرى لحظات B التي تسبق ولوجه في الأفق، ولكن بعد فترات انتظار تظل تطول وتطول. فإذا فرضنا أن B يعبر الأفق عندما تسجل ساعته الثانية عشرة بالتحديد فإن هذا الحدث لايمكن أن يشاهده A في الواقع أبداً ولكن ماسيراه على التوالي هو أن قراءات ساعة B: 11:30، 11:45، 11:52، 11:56، 11:58، 11:59، 11:59، 11:59، 11:59، 11:59 كـأن بينها، من وجهة نظره، أي نظر A فواصل زمنية متساوية تقريباً. لذلك سيظل B من حيث المبدأ مشاهداً من قبل A وسيبدو محوماً، إلى الأبد فوق الأفق تماماً، وستقترب ساعته تدريجياً وببطء متزايد من نهايتها الساعة الثانية عشرة ولكن من غير أن تدركها تماماً. غير أن صورة B كما يدركها A سرعان ماتصبح في حقيقة الأمر باهتة فلايمكن تمييزها. وماهذا إلا لأن الضوء القادم من الجزء الضئيل من خط B الكوني الواقع خارج الأفق محاذياً له، لابد أن يصبح بديلاً عن كامل الزمن المتبقي الذي سيقضيه A. ومن الوجهة الواقعية فإن B سيمّحى في نظر A وهذا ينطبق على كامل الجسم المنهار الأصلي. فكل ماسيراه A هو مجرد ثقب أسود!

وماذا عن B المسكين؟ وماذا ستكون *تجربته*؟ يجب أن نشير في بادئ الأمر إلى أنه لايوجد أي شيء، مهما كان أمره، يلفت نظر B عند احتيازه الأفق. فحين يكون مؤشر ساعته حول الساعة 12، يلقي عليها نظرة خاطفة، فيرى الدقائق تمر بانتظام: من 11:57، 11:58، 11:59، 12:00، 12:01، 12:02، 12:03 ... ولايبدو له أي شيء شاذ بعد تجاوز الساعة 12:00 الخاص وبإمكانه أن ينظر إلى A خلفه فيرى أنه باق تحت بصره طيلة الوقت. ويستطيع أن ينظر إلى ساعة A فيراها تتقدم إلى الأمام بطريقة نظامية مطردة. وما لم يعرف B *من الحسابات* بأنه لابد قد احتاز الأفق، فإنه لن يملك وسيلة ليعرف ذلك[10]. لأن الأفق غدار إلى أبعد حد، فما أن يجتازه حتى يصبح أسيراً لامفر له منه. وسيجد في النهاية أن كونه المحلي ينهار أخيراً حوله وانه سائر لملاقاة "انسحاقه الكبير" الخاص به بعد قليل.

أو ربما ليس خاصاً لهذه الدرجة، إذ إن مادة الجسم المنهار كلها التي كونت الثقب الأسود في السابق، ستكون، بمعنى ما، مشاركة في الانسحاق "نفسه" معه. ففي حقيقة الأمر، إذا كان الكون *خارج* الثقب الأسود مغلقاً فضائياً، بحيث أن المادة الخارجية هي أيضاً منغمسة إلى أبعد حد في الانسحاق الكبير الشامل لكل شيء، فإنه يتوقع عندئذ لهذا الانسحاق أن يكون مثل انسحاق B الخاص نفسه*

كما لايتوقع لِ B على الرغم من مصيره البائس أن تكون الفيزياء المحلية التي يخضع لها حتى هذه المرحلة، مغايرة للفيزياء التي عرفناها وفهمناها، ولاسيما أننا لن نتوقع معاناته من خرق محلي لقانون الترموديناميك الثاني ولامن سلوك بالتالي ينعكس فيه تماماً تزايد الأنطروبية المألوف. ففي الثقب الأسود كما في خارجه يصمد القانون الثاني وتظل الأنطروبية تتزايد في جوار B دونما توقف حتى لحظة انسحاقه النهائي.

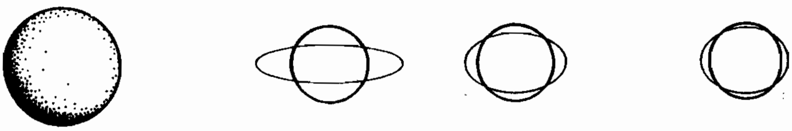
ولكي نفهم كيف يمكن للأنطروبية أن تكون بالفعل هائلة الارتفاع في الانسحاق الكبير (سواء منه الخاص أم الشامل)، في حين أنها كانت قطعاً منخفضة جداً في الانفجار الكبير، لابد لنا من التعمق أكثر قليلاً في هندسة الزمكان في الجسم الأسود. ولكن على القارئ قبل هذا أن يتأمل ملياً في الشكل 7-14 الذي يصف انعكاس الزمن الافتراضي في ثقب أسود، وهذا بالتحديد ثقب *أبيض*. والحقيقة أن الثقب الأبيض ***لاوجود*** له على الأرجح في الطبيعة، إلا أن إمكانية حدوثه النظرية مفيدة جداً لنا في دراستنا.

---

* حين كتبت ذلك كنت أتبنى افتراضين: الأول: هو أن إمكان اختفاء الثقب الأسود نهائياً بحسب تبخره (البطئ جداً) نتيجة إشعاع هو كنغ الذي سندرسه فيما بعد (انظر ص 404) لابد أن يحبطه انهيار الكون ثانية. أما الثاني (وهو مقبول) هو فرض يعرف باسم الرقابة الكونية (ص262).

بنية الشذوذات* الزمكانية

نذكر من الفصل الخامس (ص 250) كيف يكشف انحناء الزمكان عن نفسه على صورة ***أثر مدّي***. إذ إن السطح الكروي الذي يتألف من جسيمات تنجذب بحرية نحو جسم كبير نتيجة تأثير حقله الثقالي، يتطاول في اتجاه واحد (على طول الخط المتجه إلى الجسم الثقيل) ويضيق في الاتجاهات المتعامدة مع هذا السابق ويزداد هذا التشوه المدّي كلما اقترب من الجسم الثقيل (الشكل 7-15)، متغيراً بتناسب عكسي مع مكعب المسافة عنه. ويمثل ذلك التأثير المدّي المتزايد أيضاً يشعر الملاّح الفلكي B حين يسقط في اتجاه الثقب الأسود إلى الداخل ويكون هذا التأثير المدّي هائلاً في حالة ثقب أسود تعادل كتلته بضعة كتل شمسية - بل إنه هائل لدرجة أن الملاح الفلكي لن يكون قادراً على تحمل الاقتراب من الثقب، ناهيك عن اجتيازه للأفق. أما في حالة الثقوب الأكبر، فيكون التأثير المدي عند أفقها في الحقيقة أصغر. وفي حالة الثقب الأسود المكوَّن من ملايين الكتل الشمسية، الذي يعتقد فلكيون عديدون بإمكان وجوده في مركز مجرتنا درب التبانة، فإن التأثير المدي يكون صغيراً لايذكر حين يجتاز الملاح الأفق، على الرغم من أنه على الأرجح كافٍ لأن يجعل الملاح يشعر بشيء من الإزعاج. غير أن هذا التأثير المدي لن يظل صغيراً طيلة سقوط الملاح إلى الداخل، فهو على كل حال يرتفع بسرعة إلى اللانهاية في غضون ثوانٍ معدودة! ولن يعاني جسد الملاح المسكين بهذا الارتفاع السريع لقوى المد، من التمزق إلى قِطع فحسب، بل إن هذا ما يحدث، وفي تعاقب سريع، للجزيئات نفسها التي كان يتكون منها وكذلك للذرات المكونة لها ولنوى هذه الذرات. وحتى للجسيمات تحت الذرية. وبهذه الصورة يُحدث الانسحاق تدميره النهائي المطلق



الشكل 7-15 : يزداد التأثير المدّي الناشئ عن جسم كروي ثقيل تبعاً لقربه، لأنه يتناسب مع مقلوب مكعب البعد عن مركزه.

ليست المادة كلها هي مايتحطم فحسب بهذه الطريقة، بل يتحتم حتى على الزمكان نفسه أن يلقى نهايته! وعندئذ تبلغ هذه الكارثة أقصاها وتدعى ***شذوذاً*** [x] ***زمكانياً***. وهنا قد يتساءل

---

[x] إن كلمة الشذوذ irregularity هنا نستعملها للدلالة على موضع معين لاعلى فعل الشذوذ بوجه عام.

القارئ كيف لنا أن نعرف أن مثل هذه الكوارث يمكن أن تحدث، وفي أي الشروط تسير المادة والزمكان نحو هذا المصير. إن هذه الأمور كلها هي نتائج نحصل عليها من المعادلات الكلاسيكية في النسبية العامة. كما نعرف في أي ظرف يتشكل الثقب الأسود. ولقد أظهر نموذج الثقب الأسود الأول الذي قال به أوبنهيمر **Oppenheimer** وسنايدر **Snyder** عام 1939 سلوكاً من هذا النوع. ومع ذلك ظل الفيزيائيون الفلكيون يحدوهم الأمل بأن هذا السلوك الشاذ كان شيئاً من صنع التناظرات الخاصة التي كانوا قد عزوها لهذا النموذج. إذ ربما كان بإمكان المادة المنهارة في الحالات الواقعية (اللاتناظرية) أن تلف وتدور بطريقة ما معقدة لتفلت بعدئذ خارج هذا الوضع ثانية. ولكن هذه الآمال كلها ولّت حين توافرت نماذج من الاثباتات الرياضية الأكثر عمومية، التي أعطت مايعرف الآن ***بنظريات الشذوذ*** (أنظر بنروز 1965 وكذلك هوكينغ وبنروز 1970). ولقد أكدت هذه النظريات ضمن إطار نظرية النسبية العامة الكلاسيكية، إضافة إلى مصادر حسية معقولة، ان شذوذات الزمكان ***لاسبيل لتجنبها*** في حالات الانهيار الثقالي.

وعلى هذا النحو، إذا عكسنا اتجاه الزمنن فسنحكم أيضاً لامحالة بوجود شذوذ زمكاني ***ابتدائي*** مقابل للسابق، وعندئذ يمثل هذا الشذوذ في أي كون يتوسع (توسعاً مناسباً) الانفجار الأعظم. أي أن الشذوذ يمثل هنا ***خلق*** الزمكان والمادة بدلاً من أن يمثل ***تحطيمهما*** النهائي. لذلك قد يبدو أن هناك تناظراً زمنياً تاماً بين هذين النوعين من الشذوذ: النوع ***الابتدائي*** الذي يخلق فيه الزمكان والمادة، والنوع ***النهائي*** الذي يدمر فيه الزمكان والمادة. ولكن عندما نفحصهما بالتفصيل نجد أن أحدهما ***ليس*** المعكوس الزمني للآخر كلياً، على الرغم من أن بينهما بالفعل تشابهاً هاماً. ولكي نفهم ذلك لابد لنا من معرفة الفروق الهندسية بين الأثنين، لأنها هي التي توضح أصل قانون الترموديناميك الثاني.

لذلك، دعونا نعود إلى تجارب ملاحنا الفلكي B الذي ضحى بنفسه، فهو سيواجه قوى مدّية ترتفع شدتها بسرعة إلى اللانهائية. ولما كان رحيله يتم في الفضاء، فالتأثيرات التي سيعاني منها هي تأثيرات، تحافظ على حجمه، ولكنها ***تشوهه***. وهي ناشئة عن موتر Tensor يُفسَّر بانحناء للزمكان، كنا قد أشرنا له بكلمة WEYL (انظر الفصل الخامس ص 250 و556). أما القسم الباقي من موتّر انحناء الزمكان أي القسم الذي يمثل الانضغاط الشامل والذي أشرنا إليه بكلمة RICCI (ريتشي)، فهو يساوي الصفر في الفضاء الفارغ. والحقيقة أن B يمكن أن يصادف مادة ما في مرحلة من المراحل. ولكن حتى وإن كانت هذه هي حاله (وهو نفسه على كل حال مكون من مادة)، سنظل نجد بوجه عام أن قياس WEYL ***أكبر بكثير*** من RICCI. بل إننا نتوقع أن نجد أن الانحناء، بالقرب من الشذوذ ***النهائي***، يهيمن عليه كلياً الموتر WEYL الذي ينتهي بوجه عام إلى ***اللانهاية***.

$$\text{WEYL} \rightarrow \infty$$

(ولو أنه قد يفعل ذلك بطريقة تذبذبية): وهذا الوضع، يبدو أنه الوضع الأساسي الخصب في حالة الشذوذ الزمكاني[11] حيث يقترن هذا السلوك الذي يتبعه الزمكان بشذوذ مرتفع ***الأنطروبية***.

إلا أن الوضع بالنسبة للانفجار الأعظم يبدو مختلفاً كل الاختلاف. فهناك نحصل على نماذج هذا الانفجار القياسية من زمكانات فريدمـان – روبرتسـون – ووكـر (FRW) العالية التناظر التي كنا قد تحدثنا عنها سابقاً. ففي هذه الحالة لاوجود *إطلاقاً* للموتر WEYL الذي يـؤدي إلى التشوه المدي^x . بل بوجود بدلاً منه تسارع متناظر إلى الداخل يؤثر في أي سطح كروي مكون من قشرة من الجسيمات (انظر الشكل 5–26). وهذا التأثير في الحقيقة هو تأثـير الموتـر RICCI بدلاً من الموتر WEYL. إذ إن المعادلة الموترية:

$$WEYL = 0$$

هي صحيحة في اي نموذج من نماذج FRW. فحين نقترب من الشذوذ الابتدائي بالتدريج، نجـد أن الموتر RICCI هو الذي يصبح لانهائياً بدلاً من WEYL أي أن الموتـر المهيمـن بـالقرب مـن الشذوذ الإبتدائي هو الأول لا الثاني، وهذا ما يؤدي إلى شذوذ ***منخفض الأنطروبية***.

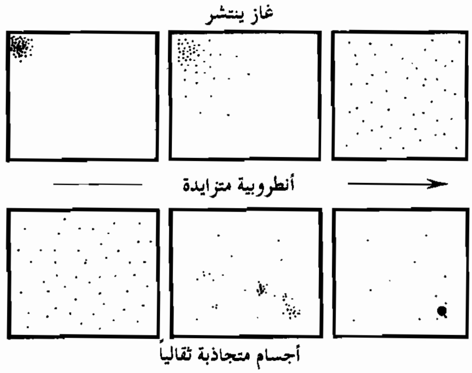
وإذا تمعنا في شـذوذ ***الإنسحاق*** الأعظـم في نمـاذج FRW المثاليه ***الدقيقة***، وجدنـا قطعـاً أنWEYL يساوي الصفر عند الإنسحاق في حين أن RICC ينتهـي إلى اللانهايـة، إلا أن هـذا الوضع خاص جداً، ***وليس*** هو مانتوقعه بالنسبة لنموذج واقعـي تمامـا يؤخـذ فيـه بعـين الإعتبـار التجمع الثقالي، حيث تأخذ المادة (التي تكون في بادئ الأمر على شكل غـاز منتشـر) بـالتجمع مع تقدم الزمن، في مجرات من النجوم. وفي الوقت المناسـب ستنكمش أعـداد كبـيرة مـن هـذه النجوم انكماشاً ثقالياً، وتتحول إلى أقزام بيضاء ونجوم نترونيـة وثقـوب سـوداء. ومـن المرجـح جداً وجود ثقوب سوداء هائلة في مراكز المجرات. ويمثل التجمـع – ولاسـيما في حالـة الثقـوب السوداء – تزايداً هائلاً في الأنطروبية (أنظر الشكل 7–16). وهنا قد يبدو مـن غـير المعقـول في بادئ الأمر، أن تمثل حالات التجمع أنطروبية ***مرتفعـة*** والحـالات الملسـاء المتجانسـة[†] أنطروبيـة منخفضة، لأننا نتذكر أنـه في حالـة غـاز موجـود في علبـة، كـانت حـالات التجمـع ***منخفضـة*** الأنطروبية (كما هوالحال في غاز متجمع كله في زاوية العلبة)، بينما، في حالـة التـوزع المنتظـم عندما يتم التوازن الحراري تكون الأنطروبية ***مرتفعة***. ولكن هـذا الوضـع ***ينقلـب*** عندمـا تؤخـذ الثقالة في الحسبان، وذلك بسـبب طبيعـة التجـاذب الشـاملة في الحقـل الثقـالي حيـث يتصـاعد التجمع أكثر فأكثر مع الزمن، وأخيراً يتخثر العديد من الثقوب السوداء وتتوحـد شـذوذاتها في شذوذ الإنسـحاق النهـائي الهـائل المعقـد جـداً. ولايشـبه هـذا الشـذوذ النهـائي، بأيـة صـورة، الانسحاق الكبير المثالي في نموذج FRW المنهار المقيد بالشـرط WEYL=0 إذ طالمـا أن التجمـع يتفاقم أكثر فـأكثر[(11)] فثمـة ميـل دائمـاً لأن يـتزايد الموتـر WEYL وأن ينتهـي بوجـه عـام إلى اللانهائية في أي شذوذ نهـائي. أنظـر الشـكل 7–17 حيـث تجـد صـورة زمكـان تمثـل التـاريخ الكامل لكون مغلق وتتفق مع هذا الوصف العام الذي ذكرناه

---

^x إذ ينظر عندئذ إلى الكون بمجموعه فلاوجود لمادة خارجه، وكل كرة في مركزه تؤثر في الطبقـة الأعلى منهـا (ولكـن هذا الوضع مثالي ومايحدث هو غير ذلك في الواقع كما ستبين الفقرة التالية)

[†] أي من دون شذوذات أو ثقوب سوداء

وهكذا نرى الآن كيف أن الكون المنهار *ليس* بحاجة لأن تكون أنطروبيته صغيرة. ولم يكن إنخفاض الأنطروبية عند الإنفجار الأعظم (أي هذا الانخفاض الذي أعطانا القانون الثاني) مجرد نتيجة لصغر الكون في زمن الإنفجار! ولو شئنا قلب إتجاه الزمن في صورة الإنسحاق الأعظم التي حصلنا عليها أعلاه، لحصلنا عندئذ على إنفجار أعظم أنطروبية هائلة *الإرتفاع*، ولما كان لدينا قانون ثان فالكون قد خلق ولسبب ما، في حالة (أنطروبية منخفضة) خاصة جداً، بحيث فُرض عليه فيهاً قيد (أو شرط) نماذج FRW الذي هو من قبيل WEYL=0. ولو لم يكن هناك قيد من هذا الطراز، لكان "هناك احتمال كبير جداً" بأن يكون الشذوذان الابتدائي والنهائي عندئذ من نوع WEYL→ ∞ المرتفع الأنطروبية (أنظر الشكل 7–18) ولما كان هناك فعلاً، في عالم "محتمل"، وجود لقانون الترموديناميك الثاني.



الشكل 7–16 : في حالة غاز عادي، تسعى الأنطروبية المتزايدة لأن تجعل التوزيع أكثر انتظاماً.أما في حالة أجسام متجاذبة ثقالياً فالعكس هو الصحيح. إذ يحدث ارتفاع الأنطروبية نتيجة التجمع الثقالي - وتبلغ أقصاها في الانهيار إلى ثقب أسود



الشكل 7–17 : التاريخ الكامل لكون مغلق، فهو يبدأ من انفجار أعظم منتظم منخفض الأنطروبية و WEYL = 0 وينتهي بانسحاق أعظم مرتفع الأنطروبية - ممثلاً بتكتل العديد من الثقوب السوداء - حيث WEYL → ∞



الشكل 7-18 : إذا ألغي القيد WEYL = 0، يكون لدينا عندئذ انفجار أعظم مرتفع الأنطروبية أيضـــاً. وينتهي WEYL هناك إلى اللانهاية. وسيكون هذا الكون مثقباً بثقوب بيضاء من دون أن يكون هناك قانون ثان في الترموديناميك. فهو في خلاف هائل مع التجربة.

إلى أي مدى كان الانفجار الأعظم حالة خاصة؟

دعونا نحاول أن نفهم فحسب إلى أى مدى كان شـرط مـن قبيـل WEYL=0 ملزماً عنـد الانفجار الأعظم. لذلك، وللسهولة سنفترض (كما في العرض السـابق) أن الكـون مغلـق وأن هناك في الكون، علاوة على ذلك - ولكي نتمكن من تكوين صورة واضحة المعالم - عدداً B من ***الباريونات*** (أي من البروتونات والنترونات معاً) معطى بتقريب بالمعادلة:

$$B=10^{80}$$

(لايوجد مبرر خاص لاعتماد هذا العدد، ما عدا ***الحقيقة*** الرصدية بأن B يجب أن يكـون كبـيراً بهذا القدر ***على الأقل***، وقد ادعى ادنجتـون Eddington مـرة أنـه حسـب B حسـاباً ***صحيحاً*** وحصل على عدد كان قريباً من القيمة أعلاه، إلا أن أحداً غيره لم يصدق حسابه أبداً، ولكن يبدو أن القيمة 10^{80} قد ***ثبتت***). فلو اتخذت أكبر من ذلك (وربمـا كـانت B = ∞ في حقيقـة الأمر)، لكانت الأعداد التي سنحصل عليها مذهلة ***أكثر*** أيضاً من الأعداد الخارقة التي سـنتوصل إليها بعد قليل.

لنحاول أن نتخيل الآن فضاء طور الكون ***بأجمعه*** (أنظر ص 220) حيث تمثل كل نقطة من هذا الفضاء طريقة مختلفة محتملة يمكن أن يكون الكون قد بدأ منهـا. ولنتخيـل أن هنـاك كائنـاً هائلاً أخذ يشير إلى نقطة من فضاء الطور لتكون هي بداية الكون (الشكل 7-19)، بمعنـى أن كل إشارة من هذا الكائن إلى نقطة مختلفة تؤدي إلى كون مختلف. وعندئذ تتوقف الدقة اللازمة

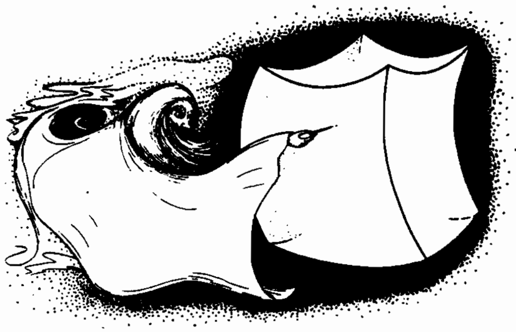
للإشارة إلى كون معين على أنطروبية الكون الذي سيختاره. لذلك سيبدو من السهل عليه نسبياً أن يشير إلى كون ذي أنطروبية مرتفعة، لأن هناك عندئذ حجماً كبيراً من فضاء الطور يمكن أن يشير فيه إلى أي نقطة منه (إذ تتناسب الأنطروبية كما نذكر مع لغرتم الحجم المعني من فضاء الطور). في حين أنه لابد لجعل الكون يبدأ بأنطروبية منخفضة - أو ليكون هناك فعلاً قانون ثانٍ في الترموديناميك - من أن يشير هذا الكائن إلى إحدى نقاط حجم صغير جداً في فضاء الطور. وهنا نتساءل: ترى إلى أي مدى يجب أن يكون هذا الحجم ضئيلاً لكي يكون الكون الناتج شديد الشبه بالكون الذي نعيش فيه حالياً؟ للإجابه عن هذا السؤال، علينا أن نعود أولاً إلى دستور رائع كان قد وجده ج.بكنشتاين Jacob Bekenstien (1972) و س.هوكينغ Stephen Hawking (1975)، وهو دستور يعلمنا كم يجب أن تكون أنطروبية *ثقب أسود.*

لنعتبر ثقباً أسود مساحة سطح أفقه هي A، فتعطى أنطروبيته S_{bh} عندئذ بحسب دستور بكنشتين - هوكينغ بالصيغه التاليه:

$$S_{bh} = \frac{A}{4} \times \left(\frac{kc^3}{\hbar G} \right)$$

حيث k هي ثابت بولتزمان و c هي سرعة الضوء و G ثابت نيوتن للثقاله و $\hbar$ ثابت بلانك مقسوماً على 2π . إن الجزء الأساسي من هذا الدستور هو $A/4$، أما الجزء الواقع داخل قوسين فهو يتألف فحسب من الثوابت الفيزيائية المناسبة. لذلك فإن أنطروبية الثقب الأسود متناسبة مع مساحة سطحه. وفي حالة ثقب أسود متناظر كروياً. تصبح هذه المساحه متناسبة مع مربع كتلة الثقب.

$$A = m^2 \times 8\pi (G^2/c^4)$$



الشكل 7-19 : إذا أراد هذا الكائن الكبير الذي تخيلناه أن يدل على عالم كذاك الذي نعيش فيه، فعليه عندئذ أن يشير إلى حيز نكاد لانصدق ضآلته من الفضاء الطوري للعوالم الممكنة -إذ تقرب نسبة هذا الحيز من $1/10^{10^{123}}$ من حجم الفضاء كله لكي يتكون الوضع الذي نعنيه (لم يرسم الشكل أعلاه بحسب النسب الصحيحة).

فإذا عوضنا عن A بهذه القيمة في دستور بكنشتين-هوكينغ وجدنا ان أنطروبية الثقب الأسود متناسبة مع مربع كتلته

$$S_{bh} = m^2 \times 2\pi\,(kG/\hbar c)$$

وهكذا يتضح أن ***أنطروبية واحدة الكتل*** (S_{bh} / m) في جسم أسود، تتناسب مع كتلته. فكلما كان الثقب الأسود أكبر، كبرت معه أنطروبية واحدة الكتل. لذلك، فإنه في حالة كتلة كميتها معروفة – أو كذلك في حالة ***طاقة*** كميتها معروفة، (إذ لافرق بينهما استناداً إلى قانون أينشتين $E=mc^2$) تبلغ الأنطروبية أقصاها عندما تنهار الكتلة كلها إلى ثقب أسود! وعلاوة على ذلك فإن أنطروبية ثقبين أسودين تزداد (ازدياداً هائلاً) عندما يبتلع كل منهما الآخر ليشكلا ثقباً متحداً واحداً! كما أن الثقوب السوداء الكبيرة، كتلك التي يرجح أنها موجودة في مراكز المجرات، تعطي كميات كبيرة مذهلة بكل معنى الكلمة من الأنطروبية – هي أكبر بكثير جداً من أنواع الأنطروبية التي نصادفها في نماذج الحالات الفيزيائية الأخرى.

إذن لسنا بحاجة الآن إلى موهبة عظيمة لكي نقرر بأن بلوغ الأنطروبية العظمى يتم عندما تتركز الكتلة كلها في ثقب أسود، ولقد أثبت تحليل هوكينغ لترموديناميك الثقب الأسود أن ***درجة الحرارة*** المقترنة بالثقب الأسود ليست صفراً. وإحدى النتائج التي تترتب على ذلك هي أنه لايمكن لكل الكتلة – الطاقة بكاملها أن تكون محتواة داخل الثقب الأسود في حالة الأنطروبية العظمى، إذ يقوم الثقب الأسود ببلوغ هذه الأنطروبية العظمى وهو في حالة توازن مع "محيط حراري الإشعاع". ودرجة حرارة هذا الإشعاع هي فعلاً ضئيلة في حالة ثقب أسود ذي قدر معقول. ففي حالة ثقب أسود، له كتلة شمس واحدة، مثلاً، تبلغ درجة الحرارة هذه نحواً من 10^{-7} كلفن، وهذه أدنى بقليل من أخفض درجة حرارة أمكن قياسها في أي مخبر حتى الآن، كما أنها أقل بكثير من 2,7 كلفن التي هي درجة الحرارة في الفضاء بين المجرات. أما في حالة الثقوب السوداء الأضخم، فتكون درجة الحرارة الهوكينية أخفض من هذه الدرجة.

ولن تصبح درجة الحرارة الهوكينية مفيدة لدراستنا إلا في حالين: (1) إذا كان قد أمكن أن يوجد في كوننا كثير من الثقوب السوداء الضئيلة التي تسمى ***الثقيبات السوداء***. (2) إذا كان الكون لاينهار ***قبل زمن التبخر الهوكيني*** – وهو الزمن اللازم لتبخر الثقب الأسود نهائياً وزواله. ففي مايتعلق بـ (1) لايمكّن أن تتكون الثقيبات السوداء إلا في انفجار عظيم يعم فيه الشواش بصورة مناسبة. فمثل هذه الثقيبات لايمكن أن تكون كثيرة العدد جداً في كوننا الحالي، وإلا لكانت قد شوهدت آثارها حالاً. أضف إلى ذلك أنها كان يجب أن تغيب كلها معاً تبعاً لوجهة النظر التي أعرضها هنا. أما فيما يتصل بـ (2) فإن زمن التبخر الهوكيني في حالة ثقب أسود له كتلة الشمس، يجب أن يساوي تقريباً 10^{54} ضعفاً من العمر الحالي لكوننا الراهن. وفي حالة الثقوب السوداء الأكبر من الشمس يصبح هذا الزمن أطول من ذلك بكثير. لذلك لايبدو أن من هذه التأثيرات مايدخل تعديلات جوهرية في الحجج المذكورة أعلاه.

ولكي نلمس إلى حد ما ضخامة أنطروبية الثقب الأسود، دعونا نلقي نظرة على ماكان يعتقد بأنه أكبر مزود يساهم في أنطروبية الكون، وأعني به إشعاع الخلفية الجسم-أسودية التي درجة حرارتها 2,7K. فقد ذهل الفيزيائيون الفلكيون بهول كميات الأنطروبية التي يحويها هذا الإشعاع والتي تربو إلى حد بعيد عن كل أشكال الأنطروبية العادية التي نصادفها في السيرورات الأخرى (كما في الشمس مثلاً). إذ إن أنطروبية إشعاع الخلفية هي شيء من قبيل 10^8 لكل باريون (وأنا أختار هنا "الواحدات الطبيعية"، بحيث يصبح ثابت بولتزمان مساوياً الواحد الصحيح). (وهذا يعني في الواقع، أن هناك 10^8 فوتوناً في إشعاع الخلفية مقابل كل باريون). لذلك يجب أن يكون لدينا، في حال عدد الباريونات الكلي 10^{80}، أنطروبية كلية قيمتها:

$$10^{80} \times 10^8 = 10^{88}$$

هي مانقدر أنه أنطروبية إشعاع الخلفية في الكون.

فلولا الثقوب السوداء، لمثّل هذا العدد في الحقيقة أنطروبية الكون ***بأسره***، لأن الأنطروبية الموجودة في إشعاع الخلفية تطغى على الأنطروبية الموجودة في سائر السيرورات العادية الأخرى (أي غير الثقوب السوداء) ففي الشمس مثلاً يقابل كل باريون أنطروبية من مرتبة الواحد الصحيح. هذا من جهة، ومن جهة أخرى فإن أنطروبية الإشعاع الخلفي تبدو "تافهة" لاقيمة لها إطلاقاً بالنسبة لأنطروبية الثقوب السوداء. لأن دستور بكنشتين-هوكينغ. يعلمنا بأن الأنطروبية المقابلة لكل باريون في ثقب أسود كتلته شمس واحدة هي 10^{20} تقريباً (بالواحدات الطبيعية). فلو كان الكون كله مكوناً من ثقوب سوداء لها كتلة الشمس، لكان الرقم الكلي أكبر من ذلك المعطى أعلاه بكثير، وأعني أنه يساوي:

$$10^{80} \times 10^{20} = 10^{100}$$

ولكن الكون طبعاً ليس مبنياً على هذا الشكل، وإنما يعلمنا هذا الرقم، مبدئياً فحسب، كم يجب أن تبدو الأنطروبية الموجودة في إشعاع الخلفية "صغيرة" حين تؤخذ في الحسبان تأثيرات الثقالة الجبارة التي لاتعرف الرحمة.

دعونا نتخذ موقفاً أكثر واقعية إلى حد ما، وبدلاً من أن نملأ مجراتنا كلها بثقوب سوداء، دعونا نفترضها مؤلفة بقسمها الرئيسي من نجوم عادية – أي مايقرب من 10^{11} منها – وأن في قلب كل مجرة منها ثقباً أسود كتلته مليون (أي 10^6) كتلة شمس (أي كما هو من المعقول أن يوجد في مجرتنا درب التبانة). وتبين الحسابات أن الأنطروبية المقابلة لكل باريون يجب أن تكون عملياً أكبر قليلاً حتى من الرقم الضخم السابق، أعني أنها الآن 10^{21} فالأنطروبية كلها بالواحدات الطبيعية هي:

$$10^{80} \times 10^{21} = 10^{101}$$

ويمكن أن نتوقع أن يصبح قسم كبير من كتل المجرات متضمناً بعد زمن طويـل جـداً في ثقـوب سوداء عند مراكزها. وعندما سيحدث ذلـك ستكون الأنطروبية في مقـابل كـل بـاريون هـي 10^{31}، أي أن قيمتها كلها هي:

$$10^{80} \times 10^{31} = 10^{111}$$

على أننا نعتبر كونَنا مغلقاً وأنه سينهار في نهاية الأمر، فليس من غير المعقول أن نقدر أنطروبيـة الانسحاق النهائي باستخدام دستور بكنشتين–هوكينغ معتـبرين أن الكـون بأسـره مؤلـف مـن ثقب أسـود. وعندئـذ يعطينـا الدسـتور أنطروبيـة مقابلـة لكـل بـاريون قيمتهـا 10^{43} ، وقيمـة الأنطروبية الكلية المذهلة للانسحاق الأعظم بأكمله هي:

$$10^{80} \times 10^{43} = 10^{123}$$

ويمكن لهذا الرقم أن يعطينـا تقديـراً لحجـم فضـاء الطـور بأكملـه V المتـاح للكـائن الكبـير الخيالي. لأن هذه الأنطروبية يجب أن تمثـل (بلاحـدال) لغـرتم حجـم القسـم الأعظـم منـه. ولمـا كانت 10^{123} هي ***لغرتم*** الحجم، فالحجم نفسه يجب أن يساوي إذن ***قيمة أسية*** مـن مرتبـة 10 أعني:

$$V = 10^{10^{123}}$$

بـالواحدات الطبيعيـة (وقـد يشـعر بعـض القـراء أنـه كـان علـي أن أسـتخدم الرقـم $e^{10^{123}}$ ولكن e و 10 بالنسبة للأعداد التي من هذا القدر يمكـن أن يتبـادلا). وهنـا نتسـاءل: ترى كم كان كبر ذاك الحجم الأصلي W من فضاء الطور الذي أشار إليه الكائن الخيالي، لكي يؤدي إلى كون يسري فيه قانون الترموديناميك الثاني ويتسق مـع الكـون الـذي نشـاهده الآن؟ الحقيقة أنه لايهم كثيراً أن نأخذ القيمة

$$W = 10^{10^{101}} \quad \text{أو القيمة} \quad W = 10^{10^{88}}$$

أي التي يعطيها إشعاع الخلفية أو التي تعطيها الثقوب السوداء بالـترتيب، أو نـأخذ عـدداً أصغـر من ذلك بكثير (وهذا في الحقيقة أنسب) لأنه العدد الذي قد يكون هـو الفعلي عنـد الانفجـار الأعظم. ومهما يكن من أمر فإن نسبة V إلى W ستكون قريبة من:

$$V/W = 10^{10^{123}}$$

لأن هذه النسبة تساوي بتقريب جيد جداً

$$10^{10^{123}} \div 10^{10^{101}} = 10^{(10^{123}-10^{101})} = 10^{10^{123}} \quad \text{تقريباً}$$

وهكذا يتضح لنا الآن إلى أي مدى كان يجب أن يكـون الهـدف الـذي يشـير إليـه الكـائن الخيالي محدداً ودقيقاً، فهو يبلغ دقة:

جزء من $10^{10^{123}}$

وهذا عدد خارق. ولايستطيع إنسان على الأرجح أن يكتبه كاملاً بحسب الـترقيم العشـري المألوف: لأنه سيكتب 1 وعن يمينها 10^{123} صفراً على التوالي. وحتى لـو كتبنـا صفـراً علـى

كل بروتون بمفرده وعلى كل نترون بمفرده في الكون كله-بل ونستطيع (ومـن غـير مبالغـة) أن نضيف جميع الجسيمات الأخرى بالغاً مابلغت- لظللنا بعيدين حداً عن كتابة العـدد المطلـوب. فمجال الدقة اللازمة لوضع الكون في مجراه هو أصغر بما لايقارن كما يتضح مـن كـل مجـالات الدقة التي سبق لنا أن أصبحنا معتادين عليها في معادلات الدينـاميك الرائعـة (معـادلات نيوتـن ومكسويل وأينشتين) التي تحكم سلوك الأشياء من لحظة إلى أخرى.

ولكن ***ماالسبب*** ياترى في أن الانفجار الأعظم كان منظماً كل هـذا التنظيـم، في حـين أنـه يتوقع أن يكون الانسحاق الأعظم (أو الشذوذات المتمثلة في الثقوب السوداء) كلية الشـواش؟ يبدو أن من الممكن التعبير عن هذا السؤال بدلالة سلوك الجزء WEYL مـن انحنـاء الزمكـان في أماكن شواذه. وما يبدو لنا أننا سنجده هو الشرط الإلزامي:

$$WEYL = 0$$

(أو شيئاً من هذا القبيل) عند شواذ الزمكان ***الابتدائية***-ولكن ليس عند الشواذ النهائية- وهـذا مايبدو أنه يحصر مجال اختيار الكائن الخيالي في منطقة ضئيلة حداً من فضاء الطور. وقد سبق لي أن أطلقت عبارة ***فرضية الانحناء الويلي*** (نسبة إلى ويل WEYL) على الفرضية القائلـة إن هـذا الشرط ينطبق على أي شذوذ ابتدائي (وليس نهائي) في الزمكان، وهكذا، لابد أنـه قـد اتضـح أننا إذا أردنا أن نفهم من أين أتى القـانون الثـاني، فإننـا نحتـاج لأن نفهـم لمـاذا تسـري فرضيـة اللاتناظر الزمني.

ترى كيـف يمكننـا أن نسـتزيد فهمـاً لأصـل القـانون الثـاني؟ يـبدو أننـا حشـرنا في طريـق مسدودة. لأننا بحاجة لأن نفهم أولاً لماذا كان ***للشذوذات الزمكانية*** تلك البنى التي تبدو فيها. ولكن هذه الشذوذات هي مناطق بلغ فيهـا فهمنـا لفيزيائهـا غاياتـه. ولقـد شُـبِّه المـأزق الـذي يضعنا فيه وجود الشذوذات الزمكانية أحياناً بمأزق آخـر، هـو ذاك الـذي واجـه الفيزيائيين في مطلع هذا القرن، والمتعلق باستقرار الذرات (انظر ص 278). ففـي كـل مـن الحـالتين لم تقـدم النظرية الكلاسيكية الثابتة الأركان سوى الإجابة بكلمة "اللانهاية"، ولذلـك أثبتـت بأنهـا غـير مؤهلة لهذه المهمـة. ولكـن النظريـة الكموميـة أوقفـت سـلوك الانهيـار الكهرطيسـي الشـاذ في الذرات، فلماذا لايكون هناك، على هذا النحو، نظرية ***كمومية*** تسفر عن نظرية منتهية لمشكلة انهيار النجوم الثقالي بدلاً من الشذوذات الزمكانية الكلاسيكية "اللانهائية". إلا أنها قد لاتكون نظرية كمومية عادية، إذ يجب أن تكون نظرية كمومية في بنية المكان والزمـان الصحيحـة. ولابد ستدعى مثل هذه النظرية، إن وجدت نظرية ***"الثقالة الكمومية***. ولايعود عدم وجودهـا حتى الآن إلى عدم وجود الرغبة في العمل أو الخبرة أو المهارة لـدى الفيزيـائيين. لأن كثـيراً مـن علماء الدرجة الأولى الأفذاذ صبوا جهودهم لبناء مثل هذه النظرية، ولكـن بـلا جـدوى. وهـذا هو المأزق الذي انسقنا إليه أخيراً في محاولتنا لفهم السبب في اتخاذ سهم الزمن اتجاهاً وحيداً.

وهنا قد يتساءل القارئ، وهو على حق، ترى ماالفائدة التي جنيناها إذن من رحلتنا؟ لقد اضطرنا بحثنا عن السبب الذي لأجله يبدو الزمن جارياً في اتجاه وحيد إلى أن نرحل حتى نهايات الزمن، وإلى حيث تلاشت مفاهيم المكان نفسها. فما الذي تعلمناه من كل ذلك؟ لقد تعلمنا أن نظرياتنا لاتزال غير قادرة على الإجابة عن أسئلتنا. ولكن ماالفائدة التي تقدمها لنا مثل هذه الإجابات بالنسبة لمحاولتنا في فهم العقل؟ فعلى الرغم من افتقارنا لنظرية لائقة فإني أومن بأن هناك فعلاً دروساً مهمة بإمكاننا أن نتعلمها من رحلتنا هذه. أما الآن فعلينا أن نعود إلى موطننا. وستكون رحلة العودة تأملية خيالية أكثر من تلك التي اتجهت إلى الخارج. غير أنه لايوجد في رأيي طريق أخرى معقولة للعودة.

الملاحظات

1 ـ قد يفضل بعض العلماء "الخلَّص" للنسبية (أو الأصفياء) استخدام مخاريط المراقبين الضوئية بدلاً من فضاءاتهم التزامنية، إلا أن ذلك لايؤدي إلى أي اختلاف في النتيجة على الإطلاق.

2 ـ لقد تبين لي، بعد أن رأيت الكتاب مطبوعاً، أن الشخصين سيكونان وقتئذٍ قد ماتا منذ زمن طويل، وأن أحفادهما البعيدين هم الذين يمكن أن يعودوا

3 ـ يؤدي اتحاد النوى الخفيفة في أثناء تكون النجوم (كنوى الهدروجين مثلاً) وتحولها إلى نوى أثقل (كنوى الهليوم مثلاً أو الحديد في نهاية المطاف) إلى زيادة الأنطروبية في النجوم. كما أن هناك كثيراً من "الأنطروبية المنخفضة" في الهدروجين الموجود على الأرض. وقدنستفيد أخيراً من بعض هذا الانخفاض بتحويل الهدروجين إلى هليوم في محطات لتوليد الكهرباء "بالاندماج". ولاتزداد الأنطروبية بهذه الوسيلة إلا لأن الثقالة هي التي تمكّن النوى من التجمع معاً بعيداً عن العدد الكبير جداً من الفوتونات التي فرت إلى الفضاء الرحب والتي تكوّن الآن إشعاع الخلفية الجسم–أسودي الذي درجة حرارته 2,7K (انظر ص 379) ويحوي هذا الإشعاع كمية هائلة من الأنطروبية أكبر بكثير مما في مادة النجوم العادية، ولو كان بالإمكان إعادة هذا الإشعاع كله إلى باطن النجوم لأمكنه أن يفكك معظم هذه النوى الثقيلة ثانية إلى الجسيمات المكونة لها! وهكذا فإن زيادة الأنطروبية بالاندماج هي زيادة "موقتة" وماكان من الممكن أن تتم لولا تأثير التكتل الثقالي. وسنرى فيما بعد أنه على الرغم من أن الأنطروبية التي يتيحها الاندماج النووي كبيرة جداً بالمقارنة مع الكثير من مصادر الأنطروبية التي أمكن الحصول عليها حتى الآن بواسطة الثقالة بصورة مباشرة، وأن الأنطروبية في الخلفية الجسم–أسودية هي أكبر بصورة هائلة، إلا أن هذه ليست إلا مسألة موضعية بحتة وموقتة. فمصادر الأنطروبية من الثقالة هي أضخم ***بصورة هائلة*** من تلك التي في الاندماج أو في إشعاع الخلفية ذي الدرجة 2,7K (أنظر ص 400)!

4 ـ لقد أتت حفارات الآبار الفائقة العمق في السويد حديثاً بدليل يمكن أن يفسر بأنه دعم لنظرية غولد، ولكن هذا الموضوع مثير للجدل جداً نظراً لوجود تفسيرات تقليدية بديلة.

5 ـ إني أفرض هنا أن هذا النجم المنفجر هو مستعر أعظم من "النمط الثاني" ولو كان مستعراً أعظم من "النمط الأول" لتوجه تفكيرنا ثانية إلى الزيادة الموقتة في الأنطروبية التي تنتج عن الاندماج (راجع الملاحظة 3). إلا أن المستعر الأعظم من النمط الأول لاينتج الكثير من الأورانيوم على الأرجح.

6 - لقد اعتبرت النماذج التي انحناؤها المكاني صفر أو سالب نماذج ***لانهائية***. ولكن توجد طرق "لطيّ" هذه النماذج وجعلها تصبح منتهية. إلا أن هذه النتيجة–التي لايرجح أنها ذات صلة بالكون الحالي–لاتؤثر تأثيراً كبيراً في عرضنا. كما أني لاأنوي الاهتمام بها هنا.

7 - إن الأسس التجريبية التي تبنى عليها هذه الثقة تأتي من مصدرين من البيانات فهي تأتي في المقام الأول من أن سلوك الجسيمات حين يصطدم أحدها بالآخر عند تحركها بسرع مناسبة، فتقفز وتتجزأ وتولد جسيمات جديدة، هو سلوك أصبح معروفاً في مسرّعات الجسيمات العالية الطاقة والمشيدة في أماكن عدة على الأرض، ومن سلوك جسيمات الأشعة الكونية التي تأتي من خارج الأرض وتضربها. وتأتي في المقام الثاني من أنه من المعروف بأن الوسيطات التي تحكم الطريقة التي تتفاعل بها الجسيمات لم تتغير حتى ولو بجزء من 10^6 خلال 10^{10} سنة (راجع بارو Barrow 1988) لذلك يرجَّح جداً أنها لم تتغير أبداً تغيراً ملموساً (بل ربما لم تتغير إطلاقاً) منذ زمن الكرة النارية الأولى.

8 - لايمنع مبدأ باولي الإلكترونات، في حقيقة الأمر، من أن تكون في مكان واحد، ولكنه يمنع أي إلكترونين من أن يكونا في "الحالة" نفسها–ويتضمن ذلك أيضاً كيف يتحركان وكيف ***يكون سبيناهما***. وكانت الحجة المقدمة هنا حساسة بعض الشيء، كما كانت موضع معارضة كبيرة، وبخاصة من إدنكتون حين طرحت لأول مرة.

9 - لقد طرح الفلكي الإنجليزي ج.ميتشيل John Michell منذ عام 1784 وبعده بقليل – وبمعزل عنه – لابلاس، حجة مماثلة. فقد استنتجا في ذلك الوقت المبكر أن الأجرام الأكبر كتلة والأشد تركيزاً يمكن أن تكون بالفعل غير مرئية بتاتاً–مثل الثقوب السوداء – ولكنهما توصلا إلى حججهما، التي لايشك بنبوءتها، بالاعتماد على نظرية نيوتن التي تعد هذه النتائج بالنسبة لها في أحسن حالاتها مثيرة للنقاش. ولكن أول من أعطى معالجة مناسبة تقوم على النسبية العامة هو ج.ر.أوبنهايمر و هـ.سنايدر عام 1939.

10 - إن تحديد موقع الأفق ***بدقة*** في حالة ثقب أسود عام غير مستقر ليس في الواقع شيئاً يمكن التأكد منه بقياسات مباشرة. لأنه يتوقف جزئياً على معرفة كل المادة التي ستسقط في ***المستقبل*** داخل الثقب!

11 - انظر دراسات بيلينسكي وخالاتينيكوف وليفشيتز (1970) وبنروز (1979b)

12 - قد تكون فكرة المطابقة بين مساهمة الثقالة في أنطروبية منظومة وبين قياس معين لانحناء ويل Weyl الكلي فكرة مغرية، ولكن لم يظهر حتى الآن مثل هذا القياس المناسب (فقد يحتاج بوجه عام إلى بعض الخواص اللاموضعية الصعبة المعالجة)، ولكننا لسنا بحاجة لحسن الحظ إلى قياس كهذا للأنطروبية الثقالية في مناقشتنا الحالية.

13 ـ هناك وجهة نظر شعبية شائعة تعرف باسم "السيناريو التضخمي" وهي تزعم بأنها تفسر، من بين ماتفسره، السبب في أن الكون منتظم على نطاق واسع. وتبعاً لهذا الرأي، عانى الكون انتشاراً واسعاً جداً في بواكيره الأولى- أي توسعاً على درجة أعظم من التوسع "المعتدل" في النموذج القياسي. والهدف من هذا الفرض أن جميع الشذوذيات ستزول بنتيجة هذا التوسع الهائل. إلا أن هذا التضخم لايمكن أن يتم من دون بعض القيود الابتدائية، وهي قيود أكبر حتى من ذاك الذي فرضته كما رأينا فرضية الانحناء الويلي. كما لايدخل هذا التضخم مقوماً غير تناظري في الزمن
يفسر الفرق بين الشذوذ الابتدائي والشذوذ النهائي (وهو يعتمد إضافة إلى ذلك على نظريات فيزيائية غير جوهرية-مثل نظريات غوت GUT - لاتسمو بأي شيء لاِمكانتها ولابمرتبتها على النظريات التي دعوناها في الفصل الخامس نظريات **تلمسية** TENTATIVE (وللاطلاع على دراسة تقويم نقدي للتضخم في سياق الأفكار التي عرضناها في هذا الفصل، انظر بنروز 1989b).

الفصل الثامن

البحث عن الثقالة الكمومية

لماذا الثقالة الكمومية؟

قد يتساءل المرء : ما الجديد في ما رأيناه في الفصل السابق يمكن أن يفيد في تفسير الدماغ والعقل ؟ لقد تمكنا حقا من إلقاء نظرة سريعة على بعض المبادىء الفيزيائية الشاملة التي تجعل إدراكنا " لجريان الزمن " يسير في اتجاه واحد ، إلا أننا لم نكتسب إلى الآن ، كما يبدو، نظرة ثاقبة تهدينا في سؤالنا " لماذا ندرك بأن الزمن يجري " أو في الحقيقة " لماذا ندرك أصلا " . لذلك لا تزال أمامنا ، في رأيي ، أفكار أساسية كثيرة تنقصنا. كما لم يكن عرضي إلى الآن عرضا يتميز بالأصالة ، على الرغم من أني تقدمت سرارا بتأكيدات مغايرة للمألوف . فبعد أن حققنا معرفة لا بأس بها عن قانون الترموديناميك الثاني ، حاولت أن أقنع القارىء بأنه يمكن إرجاع أصل هذا القانون ــ الذي قدمته لنا الطبيعة بصيغته الخاصة التي اختارتها لنا ــ إلى شرط هندسي هائل فرض على الإنفجار الأعظم الذي بدأ منه الكون وجوده ، وهذا الشرط هو فرضية الانحناء الويلي . وهنا أشير إلى أن بعض الكوسمولوجيين (علماء الكون) قد يفضلون أن يطلقوا على هذا الشرط الابتدائي وصفا مختلفا عن وصفنا له ، و لكن تقييد الشذوذ الابتدائي به ضروري في جميع الأحوال . كما أن ***الاستنتاجات*** التي أوشك على استخلاصها من هذه الفرضية ، لن تكون تقليدية بالدرجة التي هي عليها الفرضية نفسها، إذ إنني أدعو إلى ضرورة إجراء تغيير في هيكل نظرية الكم الأساسي نفسه.

و الهدف من هذا التغيير سيتضح دوره عندما يصبح ميكانيك الكم موحداً توحيداً مناسباً مع النسبية العامة ، أي في إطار البحث عن نظرية ***ثقالية كمومية*** . غير أن معظم الفيزيائيين لا يعتقدون بضرورة إجراء هذا التغيير في النظرية الكمومية عندما تتوحد مع النسبة العامة ، ويضيفون إلى ذلك قولهم بأنه مهما تكن الثقالة الكمومية فإن تأثيراتها الفيزيائية التي لها صلة بمستوي دماغنا ستكون قطعا عديمة الأهمية على هذا المستوي! و سيدَّعون (و دعواهم معقولة جداً) أن هذه التأثيرات الفيزيائية ، على الرغم من أنها قد تكون مهمة فعلاً في حالة مسافة مفرطة الضآلة تعرف باسم ***مسافة بلانك**** ـــ و هي تساوي 10^{-35} مترا ، أي أصغر بنحو مئة

* و هي المسافة ($\sqrt{\hbar G c^{-3}} = 10^{-35}\text{m}$) التي تصبح " التقلبات الكمومية " عندها في مترية الزمكان كبيرة إلى درجة نتخلى معها عن تطبيق الفكرة القائلة إن الزمكان أملس (و تنتج هذه التقلبات الكمومية عن مبدأ هيزنبرغ في الارتياب (أنظر ص 299).

مليار المليار مرة من حجم أصغر الجسيمات تحت الذرية ـــ فإن هـذه التأثيرات لـن تكـون لها صلة مباشرة ، من أي نوع كان مع الظواهر التي تجري على الصعيد العـادي الأكـبر مـن ذلـك بكثير ، أي على صعيد لا يهبط إلى أدنى من 10^{-12} متراً حيث تُحْكِـم العمليـات الكيماويـة و الكهربائية (التي لها أهمية تذكر بالنسبة لنشاط الدماغ) سيطرتها . ففي حقيقـة الأمـر ، ليـس للتأثيرات الثقالية ، حتى الكلاسيكية (اللا كمومية) ، أي تأثير تقريبـا في النشـاط الكهربـائي والكيماوي . لذلك إذا لم يكن للثقالة الكلاسيكية نفسها أثر ما ، فكيف يمكـن أن يـؤدي إذن مثل هذا " التصحيح الكمومي " (الضئيل جدا) ، في النظرية الثقالية ***الكلاسيكية*** إلى أي فـرق فعلي مهما كان شأنه ؟ هذا من جهة ، ثم إنه لم يسبق أبـدا أن لوحظـت أي ***انحرافات*** عـن نظرية الكم ، لذلك ليس من المعقول أبدا بالأحرى أن نتخيل وجود انحراف ضئيل مزعـوم عـن نظرية الكم القياسية يمكن أن يكون له دور ملموس يقوم به في الظواهر الدماغية.

ولكنني سأناقش الأمر بطريقة مغـايرة ، لأنـني غـير معـني جـداً بتأثـير نظريـة الكـم في بنيـة الزمكان التي تحدثت عنها نظرية النسبية العامة، و إنما أنا مهتم، ***بالعكس***، بتأثير نظرية الزمكـان عند أينشتين في البنية الأساسية لميكانيك الكم. و هنا يجب أن أشدد على أن وجهـة النظـر الـتي أعرضها أمامكم هي وجهة نظر ***غير تقليدية***. لأن من غير المألوف أن يكون للنسبية العامة تأثير ما على الإطلاق في بنية ميكانيك الكم. فقد كان الفيزيائيون التقليديون يكرهون التصديق بـأن بنية ميكانيك الكم القياسية يمكن أن تتعدل بأي طريقة مهمـا كـانت. و مـع أن تطبيـق قواعـد ميكانيك الكم على نظرية أينشتين ، لاقى بعض العقبات المستعصية في الظـاهر، فقـد أدى هـذا بالعاملين في هذا المجال إلى اتخاذ ذلك حجة لكي يعدلوا نظرية ***أينشتين*** بدلا من نظرية الكم(1). أما أنا فأرى عكس ذلك تقريباً. لأنني أرى أن المشاكل الموجودة في نظرية الكـم هـي مشـاكل جوهرية . وأنتم تذكرون عدم تلاؤم الإجرائـينU و R في ميكـانيك الـكـــم (إذ يخضـعU لمعادلـــة حتمية بـكـــل معنى الكلمـــة ، هي ***معـادلـــة شـرودنغر*** ـ و يدعىهـذا الإجـراء، التطور ***الواحدي*** ـــ أما R فهو ***اختزال متجهة الحالة*** الاحتمالي الذي يجـب أن يطبقـه المـرء في كل مكان يعتقد أن " الرصد " قد تم فيه) . فمثل عدم التلاؤم هذا في رأيي أمـر لا يمكـن حلـه حلاً ملائما بمجرد الأخذ " بتأويل "مناسب لميكانيك الكم (على الرغم من أن الـرأي الشـائع كما يبدو يقول إن هناك حتماً تأويلا قادرا على فعل ذلك بطريقـة أو بـأخرى) . و إنمـا يجـب حله فحسب بنظرية جديدة تعطي حلاً جذرياً أصيلا بحيث يظهر فيها بـأن الإجراءيـن U وR مختلفان و أنهما تقريبان (ممتازان) لإجراء ***واحد*** محكم يكون أكثر معقولية . بـل إنـي أرى أن نظرية الكم يجب أن تتغير في جميع الأحوال ، على الرغم من دقتها العجيبـة الـتي تبديهـا. كمـا أرى المؤشرات القوية المتعلقة بطبيعة هذا التغيير لابد أن تأتي من نظرية أينشتين النسبية العامة . بل إني لأذهب حتى إلى أبعد من ذلك وأقول إن البحث نفسه عن نظريـة ***ثقاليـة كموميـة*** هـو الذي يجب أن يحوي في الواقع هذا الإجراء المركـب المفروض U/R بصفته أحد مقوماته.

هذا من جهــة ، و مـن جهـة أخـرى ، إن النتـائج المباشـرة الـتي يمكـن أن تقتضيهـا الثقالـة الكمومية، هي، بحسب وجهة النظر *التقليدية* ، من نوع خفي يتعذر جدا كشفه . و لقد سـبق أن نوهت إلى توقع تبديل جوهري في بنية الزمكان عند مسافة بلانك التي هي صغيرة إلى درجة التفاهة . كما أن هناك اعتقادا أيضا (وهو مبرر في رأيي) بأن الثقالة الكمومية يجـب أن تكـون الأساس الذي ينبني عليه التحديد النهائي لطبيعة هذه المجموعة الملاحظة حاليا" مـن "الجسـيمات الأولية " . إذ لا يوجد ، مثلاً ، حتى الآن نظرية جيدة تفسـر السـبب في أن للجسـيمات تلـك الكتل التي نعرفها لها ــ هذا في حين أن " الكتلـة " هـي مفهـوم يرتبـط ارتباطـا حميمـا بمفهـوم الثقالة. (إذ لا عمل للكتلة سوى أنها "مصدر " ثقالة) . كما أن هناك توقعا لا يسـتهان بـه، و هو أن نظرية الثقالة الكمومية الصحيحة يجب أن تفيدنا في إزالة اللانهائيات التي ترهق كاهل نظرية الحقل الكمومية التقليدية (وهذا بناء على فكـرة كـان قـد عرضهـا الفيزيـائي السـويدي كلاين OSKAR KLEIN عـام **1955** تقريبـاً) (راجـع ص **344**) و الحقيقـة أن الفيزيـاء هـي وحدة واحدة ، لذلك لابد أن تؤلف نظرية الثقالة الكموميـة *الصحيحة*، عنـد التوصـل إليهـا، جزءاً جوهرياً من فهمنا التفصيلي لقوانين الطبيعة العامة.

ولكننا ما زلنا بعيدين عن فهم الأمور علـى هـذا النحـو ، فضـلاً عـن أن أي نظريـة ثقاليـة كمومية ، نفترض وجودها ، ستكون قطعا بعيدة جدا عن الظواهر السائدة في سلوك الدمـاغ . والسبب الرئيسي الذي يدعونا إلى هذا القول هو أن دور الثقالة الكمومية المسلم به بوجه عـام، هو كونها كانت لازمة للخلاص من المأزق الذي انسقنا إليه في الفصـل السـابق : و نعـني بهـا مشكلة *الشذوذات الزمكانية* أي شذوذات نظرية أينشتين الكلاسيكية التي تظهر عند الانفجار الأعظم *و الثقوب السوداء* ، و كذلك عند *الانسحاق الأعظم* فيما لو انتهى كوننا أخـيراً إلى الإنهيار على نفسه[x] . أجل يمكن لهذا الدور فعلاً أن يبدو بعيدا عن غاياتنا (المتعلقة بالدماغ و العقل) . و برغم ذلك سأحاول أن أثبت أن هناك صلة وصل منطقية معهـا يصعـب الإمسـاك بها ، و لكنها مهمة . لذلك دعونا نرى ما هي هذه الصلة.

ترى ما الذي يكمن خلف فرضية الانحناء الويلي ؟

لقد سبق لي أن أشرت إلى أن وجهة النظر التقليدية ذاتها تقول بأن الثقالـة الكموميـة لابـد أن تساعد النظرية النسبية العامة الكلاسيكية على حل معضلة الشذوذات الزمكانيـة . و هكـذا فإن ما يؤمل من الثقالة الكمومية هو أن تضــع بيـن أيدينا فيزياء متماسـكة بدلا من تلـك "اللانهاية" الخالية من كل معنى التي تتوصل إليها النظريـــة الكلاسيكية . وإني لأتفق حتما مع هذا الرأي ، لأن هذا فعلا هو الموضع الذي يجب أن ***تكشف فيه الثقالة الكمومية عـن ميزتها***

---

[x] راجع الفقرة الأخيرة في الفصل السابق.

فتفسر ما عجزت النظرية الكلاسيكية عنه . و لكن يبدو أن النظريين لم يوفقوا إلى التعبير عن ذلك الواقع المدهش المتمثل في أن سمة الثقالة الكمومية هي اللاتناظر الزمني الصارخ ! لأن الثقالة الكمومية يجب أن تؤدي عند الانفجار الأعظم ـ أي ***الشذوذ عند بدء الكون*** ـ إلى ضرورة بقاء كل شرط من قبيل.

$$WEYL = 0$$

سارياً حين يصبح الحديث بلغة مفاهيم الهندسة الزمكانية الكلاسيكية معبراً و له معنى. هذا، و من جهة أخرى، لايوجد مثل هذا الشرط الضيق عند الشذوذات الداخلية في الثقوب السوداء أو عند الانسحاق الأعظم (المحتمل) ـــ أي الشذوذات المستقبلية ، فهناك نتوقع أن يصبح الموتر الويلي لا نهائيا:

$$WEYL \longrightarrow \infty$$

كلما اقتربنا من الشذوذ . وهذا في رأيي دلالة واضحة على أن النظرية الفعلية التي نبحث عنها يجب أن تكون لا تناظرية في الزمان ، أي:

يجب أن تكون الثقالة الكمومية التي نبحث عنها نظرية لا متناظرة زمنيا .

وعليه ، يجب أن يعرف القارىء أن هذه النتيجة ، على الرغم من أن ضرورتها تبدو في الظاهر مؤكدة نتيجة للطريقة التي عرضنا فيها الأمور ، فهي نتيجة غير مقبولة ، حتى أن معظم العاملين في هذا المجال يبدون نفورا من الأخذ بها . و يرجع ذلك فيما يبدو إلى عدم وجود طريق واضحة يمكن لإجراءات الاستكمام التقليدية المفهومة جداً (مهما ذهبت بعيداً) أن تؤدي في هذه الحالة إلى نظرية كمومية لا تناظرية زمنيا ، ذلك لأن النظرية الكلاسيكية (كالنسبية العامة القياسية أو أحد تعديلاتها المبسطة) التي تطبق عليها هذه الإجراءات هي نفسها متناظرة زمنيا (2) لذلك. لابد لمن يريد استكمام الثقالة من البحث في مكان آخر عن تفسير القيمة المنخفضة للأنطروبية عند الانفجار الأعظم. (هذا إذا اهتموا طبعا بمثل هذه القضايا ـــ و لكنهم غالبا لا يهتمون).

فقد يعمد فيزيائيون كثيرون إلى الاحتجاج بأن فرضية الانحناء الويلي الابتدائي هي مجرد اختيار لشرط حدي، وليست قانونا ديناميكيا ، فهي لذلك ليست مما تختص بتفسيره الفيزياء . أي أنهم يحتجون في حقيقة الأمر، بأننا وجدنا "بفعل إلهي " و أنه ليس من حقنا أن نحاول فهم السبب في اختيار شرط حدي بدلا من آخر. إلا أن التقييد الذي تقول الفرضية بأن الإله قد اختاره[x] ، ليس كما رأينا ، أقل إعجازا أو دقة من جميع الصور الإيقاعية الرائعة ، الراقية التنظيم، التي تؤلف ما سبق أن فهمناه عن قوانين الديناميك عن طريق معادلات نيوتن و مكسويل و أينشتين و شرودنغر و ديراك و أمثالهم . لأن قانون الترموديناميك الثاني ، على

---

[x] و الذي يتمثل في فضاء الطور بمساحة ضئيلة جدا و بأن $WEYL = 0$ (انظر الشكل 7 ـ 19)

الرغـم مـن ظهوره بمظهر إحصائي غامض ، فإنه ينشأ من تقييد هندسي دقيق إلى أبعد الحدود . لذلك يبدو لي من غير المعقول أن ييأس الإنسان من الحصول على أي فهم علمي للقيود الفعالـة التي تمثلت في " الشرط الحدي " و الذي نعني به الانفجار الأعظم ، في حين أن المقاربة العلميـة برهنت أنها صالحة جداً لفهم المعادلات الديناميكية . بل إن فهم القيود الابتدائية عند الإنفجـار الأعظم هو في شرعتي ، جزء من العلم مثله مثل فهم المعادلات الديناميكيـة ، و إن كـان جـزءاً من العلم لا نفهمه الفهم الصحيح.

ولقد أثبت لنا تاريخ العلم كم كـانت ثمينـة فكـرة التفريـق بـين ***المعـادلات الديناميكيـة*** في الفيزياء (مثل قوانين نيوتن و معـادلات مكسـويل) مـن جهـة، و تلـك الشـروط الـتي تسـمى الشروط الحدية من جهة أخرى ـــ و هي شروط تدعـو الحاجـة إلى فرضهـا لكـي نتمكـن مـن اختيار حلول المعادلات المناسبة فيزيائياً (أو الحـل المناسـب مـن مجموعـة الحلـول غـير المناسـبة الكثيرة)، و كانت المعادلات الديناميكيـة هـي الأولى تاريخيـا الـتي اتخذت شـكلاً بسـيطاً. إن حركات الجسيمات تحقق قوانين بسيطة، و لكـن أنسـاق الجسيمات الـتي نصادفهـا حقيقـة في الكون لا يبدو أنها تحقق قوانين بهذه البساطة . فقد تبدو هـذه الأنسـاق أحيانـاً للوهلـة الأولى سهلة بسيطة ـــ كما هو الحال مثلاً في المدارات الناقصية لحركة الكواكب التي اكتشفها كبلر ـ ولكن وجد بعدئذ أن هذه البساطة ليست إلا نتيجة لقوانين الديناميك. فعن طريق هذه القوانين وصلنا دائما إلى الفهم الأعمق. إذ ظهر أيضا أن هذه الأنساق البسـيطة هـي أقـرب لأن تكـون مجرد تقريبات لأنساق أكثر تعقيداً بكثير ، مثلما هو الحـال في الاضطرابـات الملاحظـة فعليـاً في مدارات الكواكب . إذ تبين أنها ليست ناقصية تماماً و أنه لا يمكـن تفسـيرها بمعـادلات نيوتـن الديناميكية . أما الشروط الحدية فهي التي تعين الوضع الذي " تنطلق منـه " المنظومـة موضـوع البحث ، ومن بعده تتولى المعادلات الديناميكية أمر المنظومة . و هذه القدرة على التفريق (التي أصبحنا نملكها) بين سلوك الكون الديناميكي و مشكلة التعرف إلى نسق محتـواه الراهـن، هـي من أعظم إنجازات علم الفيزياء.

إذن لقد قلنا إن هذا التفريق بين المعادلات الديناميكية و الشروط الحدية ، كان تاريخيا على درجة كبيرة من الأهمية. لا سيما أن إمكانية القيام دائماً بهذا التفريق (أو الفصل) موجـودة في نمط ***خاص*** من المعادلات (هوالمعادلات التفاضلية) الـتي تطالعنـا دائمـاً في الفيزيـاء. ولكـني لا أعتقد أن هذا التفريق هو تفريق (أو فصل) نهائي. وفي رأيـي أننـا عندمـا سـنتوصل أخـيراً إلى معرفة القوانين أو المبادىء التي تتحكم ***فعلاً*** بسلوك كوننا ـــ بـدلا مـن التقريبـات الممتـازة الـتي فهمناها حتى الآن و التي تؤلف حالياً نظرياتنا الفاخرة ـ سنجد أن هـذا التمييـز بـين معـادلات ديناميكية و شروط حدية، سيزول نهائياً، و سيحل مكانه مخطط استيعابي شامل واحد لا غير، رائع الاتساق، وأنا أعبر طبعا في قولي هذا عن وجهة نظر شـخصية محضـة ، قـد لا يتفـق معـي كثيرون عليها، و لكنها وجهة نظر من قبيل تلك الغامضة التي كونتها في ذهني عندمـا حـاولت

استطلاع النتائج التي يمكن أن تسفر عنها نظرية ثقالية كمومية مجهولة (وسيكون لوجهة النظر هذه أثر أيضا في بعض من أكثر الملاحظات خيالا و تأملا في الفصل الأخير).

و لكن كيف يمكن أن نستكشف مضامين نظرية لا تزال مجهولة ؟ . فهذه أمور يبدو أن لا أمل فيها إطلاقاً. غير أنها ليست كذلك، لأن الانساق يهدينا إليها . و كل ما أرجوه أولا من القارىء هو أن يسلم بأن نظريتنا المزعومة ـــ التي سأشير إليها بالأحرف ث ك ص correct quantum gravity CQG (الثقالة الكمومية الصحيحة) ـــ ستوفر لنا تفسيرا لفرضية الانحناء الويلي (ف ن و) . و هذا يعني أن الشذوذات ***الابتدائية*** لابد أن تكون مقيدة بشرط يجعل المؤثر الويلي WEYL= 0 بعد تشكل الشذوذ مباشرة . وهذا القيد (أو الشرط) لابد أن يكون نتيجة لقوانين ث ك ص، ولذلك يجب أن ينطبق على أي " شذوذ إبتدائي " و ليس فحسب على الشذوذ الخاص الذي نشير إليه باسم "الإنفجار الأعظم ". و لست أدعي بذلك أن هناك ضرورة لوجود شذوذات إبتدائية في كوننا الحالي إلى جانب الإنفجار الأعظم، ولكن المسألة هي أنه لو كان هناك شذوذات، لكان عندئذ كل شذوذ من هذا القبيل مقيد بشرط ف ن و . إذ لابد أن يكون الشذوذ الابتدائي من ذلك النوع الذي تخرج منه ، مبدئياً، الجسيمات. و هذا سلوك معاكس للسلوك الذي تبديه الثقوب السوداء ، لكون هذه الأخيرة هي الشذوذات ***النهائية*** التي يمكن أن تسقط فيها الجسيمات.

قد يكون الشذوذ الابتدائي من نمط آخر غير الانفجار الأعظم ، فقد يكون شذوذا في ثقب أبيض ـ فهذا، كما نذكر من الفصل السابع ، المعكوس الزمني للثقب الأسود (راجع الشكل 7 – 14). ولكننا رأينا أن الشذوذات داخل الثقوب السوداء تحقق الشرط $WEYL \longrightarrow \infty$ ولكن الشذوذ الآن هو شذوذ ***ابتدائي*** تتطلب فيه ف ن وأن يكون $WEYL = 0$ لذلك لابد أن يكون لدينا أيضا في الثقب الأبيض $\infty \longrightarrow WEYL$. لذلك ***تستبعد*** ف ن وظهور ثقوب بيضاء في كوننا (و هذا لحسن الحظ لا يتسق فحسب مع قوانين الترموديناميك ـــ لأن الثقوب البيضاء تتعارض تعارضا شديدا مع قانون الترموديناميك الثاني ـــ بل إنه متسق كذلك مع المشاهدات ! فلقد قبل علماء الفيزياء الفلكية من حين لآخر بوجود ثقوب بيضاء لكي يحاولوا تفسير بعض الظواهر ـــ غير أن هذا الافتراض يثير دائماً من المشاكل أكثر بكثير مما يحل) . و لربما لاحظ القارىء أنني لم أسم الانفجار الأعظم نفسه ثقبا " أبيض ". إذ لابد أن يكون الثقب الأبيض شذوذا إبتدائياً من النوع ***المتوضع*** الذي لا يمكن أن يحقق الشرط $WEYL = 0$، في حين أن الانفجار الأعظم الذي هو من النوع غير المتوضع ، يمكن أن يحقق الشرط $WEYL=0$ لأن فرضية الانحناء الويلي تبيح وجوده عندئذ باستخدامها لهذا الشرط.

وهناك إمكانية من نمط آخر تصلح أن تكون " شذوذا إبتدائيا " هي نقطة ***الإنفجار نفسها لثقب أسود*** كان قد ***اختفى*** في النهاية . (ولنقل) بعد 10^{64} سنة نتيجة للتبخر الذي تخيله

هوكنغ (ص 404 أنظر أيضا فيما يأتي ص 427)و تجري الآن دراسات كثيرة حول طبيعة هذه الظاهرة الافتراضية (و المستنده إلى حجة معقولة).و يرجح فيما أعتقد ألا يكـون بينهـا و بـين ف ن و أي خلاف ، إذ يمكن لمثل هذا الانفجار (المتوضع) أن يكون فورياً فعلاً ومتنـاظراً، و لا أرى فيه وجه خلاف مع الفرضية WEYL = 0. وفي جميـع الأحـوال ، إذا فرضنـا أن ليـس هناك ثقيبات سوداء صغيرة (أنظر ص 404) فيرجح عندئذ ألا يحدث الانفجار الأول مـن هـذا القبيل إلا بعد أن يكون قد مضى على وجود الكون ما يقرب من 10^{54} مرة من طول الزمنT[x] الذي مضى على وجوده حتى الآن ، ولكي نأخذ فكـرة عـن مـدى طـول الزمـن $T \times 10^{54}$ دعونا نفرض أن T قد انكمشت إلى أقصـر زمـن يمكـن أن يقـاس ــ و هوزمـن تفكـك أصغـر الجسيمات غير المستقرة عمراً ـ عندئذ سيقصر عمر كوننا الحالي ـ على هذا الأساس ـ عن هـذه المدة$T\times 10^{54}$.بمعامل يزيد قليلا على مليون المليون.

قد يتخذ بعضهم منحى آخر غير ذاك الذي سرت فيه ، فقد يحـاجون (3) بأنـه لا يجـوز أن تكون الثقالة الكمومية الصحيحة (CQG) غير متناظرة زمنيا ، ولكن هـذا المنحى سـيتيح في الحقيقة وجود نمطين من البنية الشـذوذية، أحدهمـا يتطلـب أن يكـون WEYL = 0. والآخـر منهما يسمح بأن يكون $\infty \longleftarrow$ WEYL ، و لقد صادف طبعا أن كـان في كوننـا شـذوذ من النمط الأول ، و أن إدراكنا لاتجاه الزمن جاء على نحو يجعل هذا الشذوذ (بسبب القـانون الثاني) يأتي فيما ندعوه " الماضي " و ليس فيما ندعوه " المستقبل ". ولكن هـذه الحجـة فيمـا يبدو لي ، غير ملائمة في صورتها هذه . فهي لا تفسر السبب في عدم وجود شذوذات إبتدائيـة ***أخــرى*** مـن الذي يبيح $\infty \longleftarrow$ WEYL (ولا السبب أيضاً في عـدم وجـود شـذوذ آخر من النمط WEYL= o ولماذا لم تنخر الكون ، تبعا لوجهة النظر هـذه ، ثقـوب بيضـاء؟ فعدم وجود هذه الثقوب يحتاج إلى تفسير مادام الكون ، كما يفترض ، تنخره ثقوب سوداء*.

وهناك أيضا حجـة أخـرى تثـار أحيانـا في هـذا السـياق هي مـا يدعـى ***المبـدأ الإنسـاني*** ***anthropic principle*** (راجع بارو Barrow وتيبلر Tipler 1986). وهي تقول إن هذا الكون الخاص الذي نرى أنفسنا الآن نعيش فيه ، لم يقع عليه الاختيـار مـن بـين الأكـوان ***المحتملة*** إلا لأننا (نحن أو على الأقل نوع من المخلوقات الواعيـة) ينبغـي أن نكـون موجوديـن فيـه لكـي نلاحظه ! (و سأناقش هذا المبـدأ الإنسـاني مـرة ثانيـة في الفصـل العاشـر) . فالقـائلون بهـذه

---

x Tهـو عمر كوننا كما يقدرونه حاليا ، و هو يساوي تقريبا 15 ــ 20 مليار سنة.

* قـد يحتج بعضهم (عن حق) بأن الأرصاد ليست كافية الوضوح بأي صورة كانت لكي تدعـم زعمـي بـأن هنـاك ثقوبا سوداء في الكون لا بيضاء . غير أن حججي هي في الأساس نظرية . إذ يتفق وجود الثقوب السوداء مع قانون الترموديناميك الثاني ، في حين أن الثقوب البيضاء لا تتفق معه (وكان مـن الممكـن طبعـا التسـليم بفرضيـة وجـود القانون الثاني و بعدم وجود الثقوب البيضاء ، بيد أن محاولتنا هنا ترمي إلى أبعد من ذلك ، إنهـا تبحـث عـن أصـل القانون الثاني نفسه) .

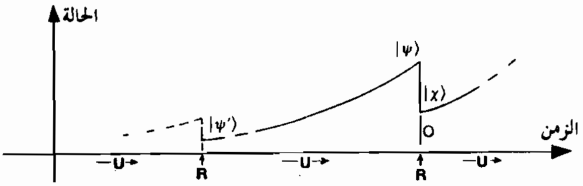
الحجة، يدعون ضمنا بأن الكائنات الذكية لا يمكن أن توجد إلا في كون كان انفجاره الأعظم ذا نمط خاص جداً ـ وهكذا يمكن لـــ ف ن و أن تكون نتيجة لهذا المبدأ. ومع ذلك قد لا تفلح هذه الحجة في التقرب، بأية وسيلة كانت، مـن العـدد $10^{10^{123}}$ المطلـوب ، وذلـك لخصوصيـة الانفجار الأعظم كما رأينا في الفصل السابع (أنظر ص 406) إذ تدل حسابات أولية جداً علـى أن المنظومة الشمسية كان من الممكن أن تخلق (مع كل قاطنيهـا) بمجـرد حـدوث تصادمـات عشوائية بين الجسيمات ، بل و " بيسر " أكثر من الانفجار الأعظم بكثير ، أي أن " احتمـال ألا تخلق" عندئذ صغير جداً لا يتعدى رتبة جزء واحد من $10^{10^{60}}$ (وهذا ما يدل عليه حساب الحجوم في فضاء الطور). وهذا كل مايستطيع المبدأ الإنساني أن يقدمه لنـا . و لذلـك لا زلنـا بعيدين بعدا هائلا عن الرقم المطلـــوب . يضاف إلى ذلك أن هذا البرهان الإنساني، مثلـه مثـل وجهة النظر التي سبق لنا مباشرة أن درسناها، لا يفسر لنا عدم وجود الثقوب البيضاء.

اللا تناظر الزمني في اختزال متجهة الحالة

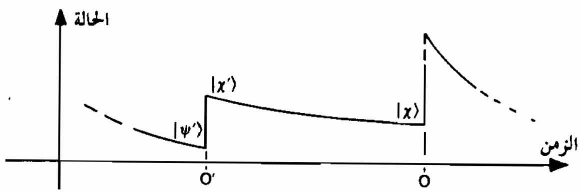
يبدو أننا قد انتهينا فعلا إلى استنتاج أن نظرية الثقالة الكموميـة الصحيحـة يجـب أن تكـون نظرية لا متناظرة زمنياً، حيث فرضية الانحناء الويلي (ف ن و) (أو أي قيد شـبيه جـداً بهـا) هي إحدى نتائج النظرية. ترى كيف يتسنى لنـا إذن أن نحصـل مـن نظريتـين متنـاظرتين زمنيـاً (هما نظرية الكم و النسبية العامة) على نظرية لا متناظرة زمنياً ؟ .لقـد تبـين أن هنـاك عـددا من الإمكانيات التقنية المعقولة للقيام بذلك، و لكن لم تدرس أي منها دراسة جيدة جداً (أنظر أشتكار Ashtekar و آخرون 1989). ومع ذلك آمل بأن أنحو منحى مختلفاً . فقـد سـبق لي أن أشرت إلى أن نظرية الكم " متناظرة زمنياً "، غـير أن هـذا القـول لا ينطبـق في الواقـع إلا علـى القسم Uمن النظرية (في معادلة شرودنغر أو غيرها). وكنت قد أهملت عـن عمـد القسـم R (أو انهيار دالة الموجة) عند دراستي للتناظر الزمني في بداية الفصل السابع حيـث بـدا أن هنـاك وجهة نظر سائدة بأن R يجب أن يكون هو أيضاً متناظراً زمنياً. وقـد يكـون السـبب في ظهـور وجهة النظر هذه إلى حد ما هو نفور متأصل من اتخاذ R على محمل أنه " عملية " فعلية مسـتقلة عن U . وهكذا كان لابد من أن يجر تناظر U الزمني إلى تناظر R الزمني أيضـاً. و لكـني أود أن أثبت أن هذا ***غير صحيح*** ، أي أن R لا متناظر زمنياً ـ على الأقل فيما لو اكتفينا بـأن نـرى في Rإجراء يتبناه الفيزيائيون فعلا حين يحسبون الاحتمالات في ميكانيك الكم.

سأبدأ أن أذكر القارىء بالإجراء الذي طبق في ميكانيك الكم و الذي سمي اختزال متجهـة الحالة (R) (أنظر الشكل 6 — 23). فقد أظهرت في الشكل 8 — 1 باسـتخدام مخطـط أولي، الطريقة الغريبة التي تعد هي الطريقة التي تتطور بحسبها متجهة الحالة $<\psi|$ في ميكـانيك الكـم. ففي معظم الأحوال، ننظـر إلى هـذا التطـور بأنــه يســير وفقـاً للتطـور ***الواحـدي*** U (معادلـة شرودنغر). و لكن حـين نفـترض أن رصـدا مـا O (أو عمليـة قيـاس) قـد تم ، عندئـذ نتبنـى ا

الإجراء R، أما متجهة الحالة < ψ| " فتقفز " إلى متجهة حالة أخرى ولتكن < χ|، حيث < χ|، هي إحدى الإمكانات المختلفة المتعامدة < χ|، < φ، < θ |، ... إلخ) . و الذي يعين أي هذه الإمكانات سيتحقق هو طبيعة الرصدO الذي أجري . أما P ، احتمال أن تقفز متجهة الحالة < ψ|، إلى < χ|، فيعطى بنسبة مربع طويلة مسقط < ψ|، على < χ | (في فضاء هلبرت) إلى مربع طويلة < ψ|، أي^2| ψ|، (وهذه النسبة، من الوجهة الرياضية، هي النسبة نفسها لمربع طويلة مسقط < χ|، على < ψ | إلى مربع الطويلة ^{2}|χ|) وهذا الإجراء كما يبدو في الظاهر، لا متناظر زمنياً، لأن متجهة الحالة تصبح، بعد أن يتم الرصدO مباشرة، أحد عناصر المجموعة المعطاة < χ | ،< φ|، < θ |،....... المكونة من الإمكانات البديلة التي يفرضها الرصد O ، في حين أن متجهة الحالة كانت قبل O مباشرة < ψ|، هي التي لا ضرورة لأن تكون أحد هذه البدائل المعطاة. على أن هذا اللاتناظر ظاهري لا غير ، و يمكن الخلاص من وهمه باتخاذ وجهة نظر مغايرة حول تطور متجهة الحالة. بالفعل دعونا ننظر في تطور كمومي يجري في ***زمن معكوس***. (وقد مثلنا هذا الوصف الشاذ تمثيلاً ملموساً بالشكل 8 — 2) إن الحالة < χ|، هي التي يفترض الآن أن تكون فيها الجملة قبل O مباشرة ، بدلا من أن تكون بعده مباشرة ، ونفرض أن التطور الواحدي يسري على ***الرجوع*** في الزمن إلى زمن رصد سابق نرمز له بـ `O ، ولنفرض أن هذه الحالة المتطورة إلى الوراء تصبح < `χ |، (التي تأتي في مستقبل `O مباشرة ). ففي التطور الطبيعي المبين في الشكل 8 — 1 في اتجاه الزمن العادي كانت حالة الجملة في اللحظة التالية مباشرة لـ `O هي < `ψ|، أي أن هذه الحالة هي نتيجة الرصد `O، و يجب أن تتطور إلى الأمام بحيث تصبح < ψ | لحظة إجراء الرصد O .



الشكل 8 — 1 : التطور الزمني لمتجهة الحالة : هو التطور الواحدي الأملس (أي المستمر U) (الذي تنص عليه معادلة شرودنغر) يقطعه اختزال متجهة الحالة R اللا مستمر (المنقطع)

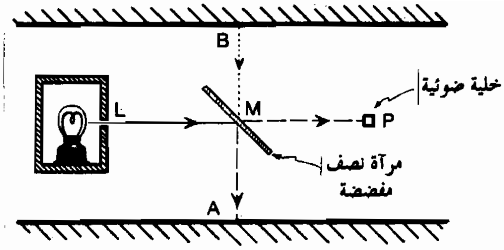


الشكل 8 — 2 : إن هذا الشكل هو تمثيل أكثر شذوذا لتطور متجهة الحالة ، حيث عُكس الزمن . وسيكون الاحتمال المحسوب الذي يربط الرصد في O بالرصد في Ó، هو نفسه كما في الشكل 8 — 1 لكن إلى أي شيء تشير قيمة الاحتمال المحسوبة هذه؟

ولكن لمتجهة الحالة <ψ´| ، نفسها دور أيضا في الوصف المعكوس زمنيا : إنهـا تمثـل حالـة المنظومة كيف كانت قبل `O مباشرة ، ومتجهة الحالة <`χ| ،هي الحالـة الـتي شـوهدت فعـلاً عند Ó وهكذا سنظن الآن، بحسب الطريقة التي ننظر بها في إطار التطور الراجع في الزمـن بـأن <ψ´| هي الحالة التي أتت " نتيجة " للرصد `O في اتجاه الزمن المعكوس. وعندئذ يعطي حساب الاحتمال الكمومي ´p الذي يربط نتيجة الرصد عند `O بنتيجة الرصد O بنسـبة مربـع طويلـة مسقط <`χ|، على <ψ´|، إلى مربـع طويلـة <`χ|، و هـذه النسـبة هـي نفسـها الـتي تم الحصول عليها في حالة التطور في الاتجاه العادي للزمن (4). (و هذه خاصة أساسية من خواص الإجراء الواحدي U).

و هكذا ، ***قد يبدو*** للقارىء أننا أثبتنا بأن ***نظرية الكم هي نظرية تظل متناظرة زمنياً*** حتـى عندما نأخذ في حسابنا العملية المنقطعة التي يصفها اختزال متجهة الحالـةR إلى جـانب عمليـة التطور الواحدي العادية U. إلا أن الواقع ***غير ذلك***، لأن مـا يصفـه الاحتمـال الكمومـي p – المحسوب بأي من الطرق ــــ هـو احتمـال أن نجـد النتيجـة (أي <χ|) عنـد O بعـد ***إعطـاء*** النتيجة (أي <ψ´|) عند `O . و هذا الاحتمال لا يساوي بالضرورة احتمال النتيجة عنـد `O نفسها بعد اعطاء النتيجة عند O فالاحتمال الأخير(5) هو في الحقيقة ما يجب أن نحصـل عليـه في الميكانيك الكمومي للزمن المعكوس. و مما يلفت النظر فعلا هو عدد الفيزيائيين الذين فرضوا ضمنا، كما يبدو، أن هذين الاحتمالين هما شيء واحد. (و أنا شخصياً ارتكبـت هـذا الخطأ في اتخاذه فرضاً مسبقاً ــــ أنظـر بـنرور 1979 ص 584) . إلا أن هذيـن الاحتمـالين همـا علـى الأرجح مختلفان اختلافاً كبيراً في واقع الأمر، و الأول منهمـا فحسـب هـو الـذي نحصـل علـى قيمته الصحيحة من ميكانيك الكم!

دعونا نشاهد ذلك في حالة بسيطة جداً من نوع خـاص. لنفـرض أن لدينـا مصبـاحاً L وخلية ضوئية P (أعني كاشفا للفوتونات). و يوجد بين المصباح L والخلية P مـرآة نصـف شفافة M تميل على الخط الواصل من L إلى P بزاوية ما و لتكن 45° أنظر الشكل 8 ــــ 3). و لنفرض أن المصباح يطلق عَرَضاً و مـن حين لآخـر، و بطريقـة عشـوائية ، فوتونـات ، و أن المصباح مصنوع بطريقـة تجعـل هـذه الفوتونـات مسـددة دائمـاً و بعنايـة كبـيرة نحـو الخليـة P (يمكن استخدام مرايا مكافئية لهـذا الغـرض). و لنفـرض إضافـة إلى ذلـك أن الخليـة الضوئيـة موثوقة مئة بالمئة و أنها تسجل كـل فوتـون تتلقـاه، وأن المصبـاح أيضـاً يمكـن أن يسـجل كـل فوتون يطلقه و أنه أمين مئة بالمئة. (لا يوجد في هذه التجهيزات المثالية أي تعارض مـع مبـادىء الميكانيك الكمومي. ولكن قد تكـون هنـاك بعـض الصعوبـات في محاولـة تحقيـق هـذا الإتقـان عملياً).



الشكل 8 ــ 3 : تجربة كمومية بسيطة تبين لا عكوسية R زمنيا . إن احتمال أن تكشف الخلية الضوئية بأن المصباح قد أطلق فوتونا هو بالتحديد نصف . و لكن احتمال أن يكون المصباح قد أطلق فوتونا علما بأن الخلية قد سجلت وصول فوتون هو حتما لا يساوي نصف.

و المفروض أن المرآة نصف الشفافة M قد صنعت بطريقة تجعلها تعكس نصف الفوتونات التي تصل إليها وتدع النصف الآخر ينفذ منها . ثم إن علينا بالأحرى أن نفكر في هذا الأمر بحسب الميكانيك الكمومي ، فنقول إن دالة الموجة للفوتون ترتطم بالمرآة ، فتنشطر إلى شطرين ، فتكون سعة الشطر المنعكس من الموجة هو $1/\sqrt{2}$ ، وسعة الشطر النافذ هي أيضاً $1/\sqrt{2}$، ويجب أن نعد الشطرين (في حالة الوصف الطبيعي بأن الزمن يتقدم) موجودان حتى اللحظة التي يتبين لنافيها بأن هناك رصد قد تم. حينذاك يتحول هذان البديلان المتواجدان معا إلى بديلين فعليين ــ أحدهما أو الآخر ــ باحتمالين يعطى كل منهما بمربع طويلة هذه السعة ، أي يساوي في كل حالة $1/2 = (1/\sqrt{2})^2$ فعندما يتم الرصد، يثبت عندئذ أن كلا من احتمالي انعكاس الفوتون و نفاذه، يساوي 1/2 بالفعل.

و الآن دعونا نرى كيف نطبق ذلك في تجربتنا الفعلية . لنفرض أن المصباح L قد سجل إطلاق فوتون . فعند المرآة تنشطر دالة موجة الفوتون و تصل إلى الخلية P بسعة مقدارها $1/\sqrt{2}$، و هكذا يكون احتمال تسجيل الخلية لهذا الأمر ، أو عدم تسجيله ، هو 1/2 في الحالين أما الشطر الآخر من دالة موجه الفوتون فتصل إلى النقطة A على أحد ***جدران المخبر*** (أنظر الشكل 8 ــ 3) بسعة هي أيضاً $1/\sqrt{2}$. ففي حال أن P لم تسجل شيئا ، عندئذ يجب أن نفترض أن الفوتون قد ضرب الحائط عند A . لأننا لو وضعنا خلية ضوئية أخرى عند A ، لسجلت عندئذ دائماً (أي في كل مرة لا تسجل فيها الخلية P أي شيء) وصول فوتون إليها، و لما سجلت أي شيء إذا سجلت P ــ هذا بفرض أن المصباح كان قد سجل فعلاً إطلاق فوتون ـ و على هذا الأساس ، لسنا بحاجة لوضع خلية ضوئية في A لأننا نستطيع أن نستدل على ما كان يمكن أن تفعله هذه الخلية فيما لو وجدت هناك، من مجرد النظر إلى L و P
والآن لابد أنه قد اتضح كيف يسير الحساب في ميكانيك الكم ، إذ نتساءل:

" ما احتمال أن تسجل P مع العلم أن L قد سجل ؟ "

لكي نجيب عن ذلك، نلاحظ أن هناك سعة هي $1/\sqrt{2}$ للفوتون عند احتيازه المسار LMP و سعة $1/\sqrt{2}$ أيضا عند احتيازه المسار LMA وهكذا نجد بعد التربيع أن الاحتمالين على التوالي هما 1/2 و 1/2 لكي يصل الفوتون إلىP أو إلى A . فجواب ميكانيك الكم عن سؤالنا هو إذن:

"نصف"

وهذا بالفعل هو الجواب الذي سنحصل عليه تجريبياً.

وكان باستطاعتنا أيضا استخدام الإجراء الشاذ ذي " الزمن المعكوس " لكي نحصل على الجواب نفسه. لنفرض أننا لاحظنا بأن P قد سجلت فوتونا. و لننظر في دالة موجة الفوتون المعكوسة الزمن، مفترضين أن الفوتون يصل أخيرا إلى P . فلما كنا نرجع في الزمن إلى الوراء، لذلك يرجع الفوتون أيضاً من Pحتى يصل إلى المرآةM . وحينذاك تنفرق دالة الموجة، و تكون هناك سعة $1/\sqrt{2}$ لكي يصل الفوتون إلى المصباح L، وسعة $1/\sqrt{2}$ لكي ينعكس عند M ليصل إلى نقطة أخرى على جدار المخبر ، و أعني بها Bفي الشكل 8 ــ3 ، فـإذا ربعنا السعة، نحصل أيضا على القيمة 1/2 لكل من الاحتمالين . ولكن لابد لنا من التأني لكي نلاحظ الأسئلة التي تجيب عنها هذه الاحتمالات . هناك في الحقيقة سؤالان، أحدهما " ما احتمال أن تسجل الخلية P فوتونا مع العلم أن المصباحL قد سجل واحدا ؟ " و هذا كالسابق، أما السؤال الثاني الأكثر غرابة فهو "ما احتمال أن تسجل P فوتوناً، علماً أن هذا الفوتون قد قذف من الحائط عندB ؟ " .

ونستطيع القول بأن الجوابين اللذين حصلنا عليهما (الاحتمال 1/2 في كلتا الحالتين) هما، بمعنى ما، صحيحان تجريبياً، على الرغم من أن الثاني (أي القذف من الحائط) يمكن أن يكون استدلالاً ، لا نتيجة لسلسلة فعلية من التجارب ! على أنه ليس بين هذين السؤالين سؤال واحد هو المعكوس الزمني للسؤال الذي طرحناه سابقاً. لأن السؤال (***المعكوس الزمني***) يمكن أن يطرح كما يلي:

" ما احتمال أن يكونL قد سجل ، مع العلم أن Pقد سجلت ؟"

نلاحظ هنا أن الإجابة التجريبية الصحيحة عن هذا السؤال ليست " نصف " إطلاقاً، و إنما هي:

"واحد"

لأن الخلية الضوئية، إذا سجلت وصول فوتون فعلاً، يكون من المؤكد فعلا عندئذ أن الفوتون قد أتى من ***المصباح*** Lو ليس من جدار المخبر ! فالحساب الكمومي أعطانا إذن، حين عكسنا الزمن في هذه المسألة ***إجابة خاطئة كلياً*** عن سؤالنا.

إن ما نخلص إليه من ذلك هو أنه لا يمكن استخدام القسم R من ميكانيك الكم لمثل هذه الأسئلة المتعلقة بالزمن المعكوس، و أنه إذا أردنا أن نحسب احتمال حالة ***ماضية*** بعد معرفة حالة ***مستقبلية***، فإن كل محاولة لتبني الإجراء القياسي Rالذي يقوم على مجرد أخذ السعة الكمومية

ثم تربيع طويلتها ، سيؤدي قطعا إلى أجوبة خاطئة . لأن هـذا الإجـراء لا ينفـع إلا في حسـاب احتمال الحالات ***المستقبلية*** بعد معرفة حالات ماضية ـــ ففي هذه الحالة يعمل بصـورة ممتـازة ! و هكذا يبدو لي أنه قد اتضح الآن بأن الإجراء R ، علـى هـذا الأسـاس، ***لا يمكـن أن يكـون متناظراً زمنياً*** (وأنه لا يمكن أن يكون إذن نتيجة للإجراء Uالمتناظر زمنياً).

يعتقـد الكثـيرون أن السـبب في هـذا التعـارض مـع التنـاظر الزمـني يعـود إلى أن قـانون الترمودیناميك الثاني قد تسلل، بطريقة ما، إلى استدلالنا، مدخلاً معه لا تنـاظراً زمنيـاً يسـتحيل وصفه بوساطة إجراءات تربيع السعة. إذ يبدو لنا فعلاً أنه لا مجال للإنكار بأن أي وسيلة قيـاس فيزيائية قادرة على القيام بالإجراء R ، لابد أن تتضمن " لا عكوسية ترموديناميكيـة " و هكـذا تزداد الأنطروبية لدى إجراء أية عملية قياس . بـل مـن المرجـح في اعتقـادي أن القـانون الثـاني يتدخل تدخلا أساسياً في عملية القياس. إضافـة إلى أن محاولـة قلـب زمـن العمليـة كلهـا في أي تجربة كموميـة كتلـك التجربـة (المثاليـة) الـتي وصفناهـا أعـلاه ، بمـا في ذلـك تسـجيل جميـع القياسات المتضمنة فيها، هي كما يبدو لي محاولة ليس لها معنى فيزيـائي كبـير . فأنـا لم أعـر في أي تجربة إهتماما يذكر للسؤال عن المضي قدما في قلب الزمن فعلياً. بل حصـرت اهتمـامي في إمكان تطبيق ذلك الإجراء الكمومي المهم الـذي يـؤدي عـادة إلى احتمـالات صحيحـة بـتربيع طويلة السعة . و إنه لمن المدهش أنه يمكن تطبيق هذا الإجراء البسيط في إتجاه المستقبل من دون أن تكون أية معرفة أخرى عن المنظومة ضرورية . ذلك بالفعل لأن عدم إمكان ***التأثـير*** في هـذه الاحتمالات هو جزء مـن النظريـة، بمعنـى أن الاحتمـالات النظريـة الكموميـة هـي احتمـالات مرتبطة بواقع ***احتمالي*** بحت .

أما إذا حاول المرء أن يطبق هذه الإجراءات في اتجاه الماضي (أعني لكي يعرف ما جرى في الماضي بدلاً من أن يتنبـأ للمسـتقبل). فعندئـذ يمنـى بالخيبـة و الفشـل . و مهمـا تقدمـت مـن مبررات للتقليل من خطورة هذا الموقف ، أو أي عوامل أخرى قد يستشهد بهـا لتفسـير سـبب عدم انطباق طريقة تربيع السعة بصورة صحيحة على الاتجاه الماضي ، فـإن هـذا كلـه لـن يغـير شيئا على الإطلاق من الواقع . في حين أن هذه المبررات لا حاجة لنا بها في اتجاه المسـتقبل ! و الأمر ببساطة أن الإجراء R، ***على النحو الذي يستخدم فيه ، هو غير متناظر زمنياً*** و هذا كل ما في الأمر.

من علبة هوكنغ إلى فرضية الانحناء الويلي

لربما تساءل القارىء،أو لا شك أنه تساءل : لكن ما علاقة ذلك كله بـــ ف ن و/ أو بـــ ث ك ص؟ صحيح أن القانون الثاني، كما يتجلى لنا تأثيره اليوم ، يمكـن أن يكـون جانبـا مـن جوانب العملية Rو لكن أين هو الدور المرموق الذي تقوم به الشذوذات الزمكانيـة أو الثقاليـة الكمومية في عملية اختزال متجهة الحالة التي تحدث يومياً من دون انقطاع؟ سـأحاول أن أعـالج

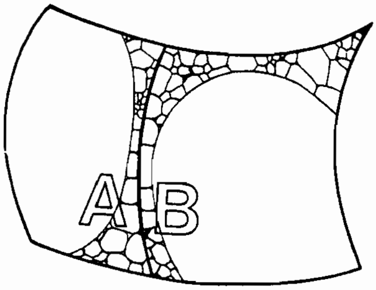
هـذا السـؤال بوسـاطة " تجربـة فكريـة " غريبـة كـان قـد ابتكرهـا سـتيفن هوكنـغ Stephen Hawking رغم من أن الهدف الذي ستستخدم لأجله هنا ليس هو الهـدف الـذي قصـده منهـا هوكنغ في الأصل.

لنتخيل علبة محكمة الإغلاق ذات أبعاد هائلة ، تعكس جدرانها كل شـيء ، وتمنـع وصـول أي تأثير، فلا يمكن لأي شيء مادي ، أو إشارة كهرطيسية أو حتى نوترينو أو أي شـيء علـى الإطلاق، أن يمر عبرها . أي أن كل شيء يجب أن يرتد راجعا سواء اصطدم بها من الخارج أم من الداخل، حتى أن تأثيرات الثقالة نفسها ممنوعة من النفاذ منها. والحقيقة أنـه لا توجـد مـادة يمكن أن تبنى منها مثل هذه الجدران، لذلك لا يمكن لأي إنسـان أن يقـوم بهـذه التجربـة الـتي سأصفها. (بل لا يمكن لأي إنسان أن يرغب بذلك كما سنرى). و لكن الأمر ليس في هـذا، و إنما الأمر أن يحاول المرء جهده لكي يكشف، في أي تجربة فكرية، الستار عن المبادىء العامـة من مجرد تأمل عقلي في تجارب قد يستطاع القيـام بهـا. كمـا يمكـن تجـاهل الصعوبـات التقنيـة بشرط ألا يكون لها أي تأثير في المبادىء العامة التي هي موضـوع البحـث (لنذكـر تجربـة قطـة شرودنغر في الفصل السادس). ففي مثالنا هنا يجب أن ينظر إلى صعوبات بناء الجـدران لعلبتنـا على أنها صعوبـات تقنيـة محضـة بالنسـبة للغـرض الـذي تبنـى لأجلـه، لذلـك سـنتجاهل هـذه الصعوبات.

أما داخل العلبة فهو مكون من كمية ضخمة من عنصر مادي لا يهمنا كثيرا أن نعرف ما هـو، بل يهمنا فحسب كتلته الكلية الضخمة جدا **M** و حجم العلبة الهائل **V** التي تحويه . ولكن مـا حاجتنا لهذه العلبة المكلفة البناء و لمحتواها غير المهم ؟ إنها فعلا أكثر التجارب مدعـاة للضجـر، إننا سندعها وشأنها ـ و إلى الأبد . ولكن المشكلة التي تعنينا هـي المصيـر النهـائي لمحتـوى هـذه العلبة. فبحسب قانون الترموديناميك الثاني، لابـدأن تـزداد أنطروبيـة هـذا المحتـوى إلى أن تبلـغ أعلى قيمة لها. و عندئذ تكون المادة قد وصلت إلى حالـة التـوازن الحـراري، و مـن بعدهـا لـن تحدث أشياء مهمة، اللهم إلا بعض التقلبات التي تؤدي إلى انحراف بسيط (نسبياً) و قصير الأمد عن التوازن الحراري. و سنفترض في حالتنا هذه أن ضخامة الكتلة **M** والحجم المناسـب لهـا **V** (أي ليس بالكبير جدا و لا بالصغير جدا)، هما بالدرجة الكافيـة لأن ينهـار معظـم المـادة عنـد بلوغ " التوازن الحراري " إلى ثقب أسود مع بقاء قليل من المادة و الإشعاع محومين حوله ـــ و يؤلفان بذلك ما يدعى "بالحوض الحراري " (البارد جداً) الذي ينغمس فيـه الثقـب الأسـود. و نستطيع ـ إذا أردنا تحديدا أكثر ـــ أن نختار **M** مساوية لكتلة المنظومة الشمسية، و **V** مسـاوية لحجم مجرة درب التبانة ! و عندئذ ستكون درجة حرارة "الحوض" قريبة من 10^{-7} درجة فوق الصفر المطلق. (10^{-7} k) .

ولكي نكون على بينة أكثر من طبيعة هذا التوازن و هذه التقلبـات، دعونـا نتذكـر مفهـوم الفضاء الطوري الذي رأيناه في الفصلين الخامس و السابع ولاسيما صلتـه بتعريـف الأنطروبيـة.

يمثل الشكل 8 ــ 4 وصفا تخطيطيا لكامل الفضاء الطوري P بما فيه محتويات علبـة هوكنـغ. و الفضاء الطوري كما نذكر هو فضاء كثير الأبعاد، تمثل كل نقطة فيه، حالة ممكنة مـن حـالات المنظومة الخاضعة للبحث كلها ــ و التي هي هنا محتويات العلبة.و هكذا ترمز كل نقطة مـنP لأوضاع الجسيمات كلها الموجـودة في العلبـة و لجميــع انـدفاعاتها إضافـة لكـل المعلومـات

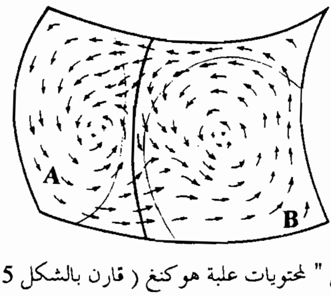


الشكل 8 ــ 4 : الفضاء الطوريP لعلبة هوكنغ. تمثل المنطقة A الحالات التي لا يوجد فيها ثقب أسود في العلبة ، و تمثل Bالحالات التي يوجد فيها ثقب أسود (أو أكثر) في العلبة.

اللازمة عن هندسة الزمكان داخل العلبة. وتمثل المنطقة الجزئية B (مـن P) الواقعـة إلى اليمـين في الشكل 8 - 4 جميع الحالات التي يوجد فيها ثقب أسود داخل العلبـة (بمـا في ذلـك جميـع الحالات التي يوجد فيها أكثر من ثقب أسود واحد). في حين أن المنطقة الجزئية A إلى اليسـار تمثل جميع الحالات الخالية من الثقوب السوداء . و علينا أن نفترض أن كلا مـن المنطقتـينA و Bستقسم بعد ذلك إلى أقسام أصغر وفقا " للحبحبة الخشنة " التي تسـاعد في كـل حالـة علـى تعريف الأنطروبية بدقة (أنظر الشكل 7 - 3 ص 370) . و لكن لا يهمنا هنا ما هـي تفـاصيل هذه التقسيمات الجزئية، بل كل ما نحتاجه في هذه المرحلة هو أن أوسع هذه الأقسـام ــ و هـو الممثل للتوازن الحراري مع وجود ثقب أسود ــــ هـو الجـزء الأكـبر في B ، في حـين أن الجـزء الأكبر من (A و هو أصغر نوعا ما من سابقه) يمثل ما يبدو أنـه تـوازن حـراري و لكـن مـن دون ثقوب سوداء في هذه الحالة.

ولنتذكر أن كل فضاء طوري، فيه حقل متجهـي (يمثـل بوسـاطة أسـهم) يمثـل تطـور المنظومـة الفيزيائية في الزمن (أنظر الفصل الخامس ص 221 وكذلك الشكل 5 - 11)، لذلـك إذا أردنـا معرفة ما الذي سيحدث بعد ذلك في منظومتنا، ما علينا إلا أن نتبع الأسهم فيP (أنظر الشكل 8 ــ 5). ولنلاحظ أن بعض هذه الأسهم سيعبر من المنطقة A إلى المنطقة B، و هذا ما يحدث عندما يبدأ تشكل أولا ثقب أسود نتيجة انهيار المادة الثقالي. ولكن هل توجد أيضاً أسهم تعـبر بالعكس، من المنطقة B إلى المنطقة A ؟ بلى يوجد ، ولكن فقط في الحالـة الـتي نـأخذ فيهـا في حسـابنا ظـاهرة ***تبخـر هوكنـغ*** الـتي أتـى ذكرهـا سـابقاً (ص 404 ــ 418). إذ إنـه طبقـا

لنظرية النسبية العامة، ***الكلاسيكية*** حصراً، ينحصر عمل الثقوب السوداء في ابتلاع الأشياء . من دون أن تطلق شيئاً. و لكن هوكنغ استطاع، حين أدخل في حسابه آثار الميكانيك الكمومي، أن يبين (عام 1975) أن الثقوب السوداء، لابد أن تكون، على الصعيد الكمومي، قادرة بعد كل اعتبار على إطلاق أشياء ، وفقا لسيرورة كمومية تحمل اسم "***إشعاع هوكنغ***" أو الإشعاع الهوكيني (و يحدث ذلك عن طريق ظاهرة كمومية هي " خلق الأزواج الافتراضية" التي تخلق فيها باستمرار من الفراغ - وللحظة قصيرة - جسيمات و جسيمات مضادة، لا لشيء إلا لينفي أحدها الآخر بعد الخلق مباشرة من دون أن تترك أثراً ما. و لكن قد يحدث أن يبتلع ثقب أسود، في حال وجوده، أحد جسيمي الزوج قبل أن يتاح له التفاني مع قرينه ، و أن يتمكن هذا الآخر من الإفلات. وعندئذ تؤلف هذه الجسيمات الهاربة الإشعاع الهوكني). ويكون هذا الإشعاع الهوكني في الحقيقة ضئيلا جداً عادة. و لكن كمية الطاقة التي يخسرها الثقب الاسود عن طريق الإشعاع الهوكني تعادل، في حالة التوازن الحراري، كمية الطاقة التي يكسبها من ابتلاعه" جسيمات حرارية " أخرى تحوم حوله في " الحوض الحراري " الذي يوجد فيه هذا الثقب الأسود نفسه. ولكن قد يصادف أن يتمكن الثقب نتيجة " التأرجحات "، من أن يطلق أكثر قليلا مما يكسب، أو يبتلع أقل مما يطلق، فيخسر بذلك من طاقته. وخسارته للطاقة تعني خسارة في المادة (بحسب قانون اينشتين: $E = mc^2$). فطبقا للقوانين التي يخضع لها الإشعاع الهوكني، ترتفع حرارة الثقب ارتفاعاً ضئيلاً جداً. فإذا صادف — وهذا نادر جداً جداً - أن كان "التأرجح " كبيرا إلى درجة كافية، بحيث أمكن للثقب أن يصبح في وضع الهارب من التوازن الحراري، عندئذ تظل حرارته تزداد باستمرار مع فقدان مزيد من الطاقة كلما ابتعد عن وضع، التوازن، ويظل الثقب يصغر باستمرار، إلى أن يختفي (كما يفترض) نهائيا بانفجار عنيف! و عندما يحدث ذلك (مع افتراض أنه لا توجد ثقوب سوداء أخرى في العلبة) يكون قد أصبح لدينا في الفضاء الطوري **P** ذلك الوضع الذي يتم العبور فيه من المنطقة **B** إلى المنطقة **A**، أي أنه توجد فعلاً أسهم من **B** إلى **A** .



الشكل 8 — 5 : "الجريان الهاملتوني " لمحتويات علبة هوكنغ (قارن بالشكل 5 — 11) حيث تمثل خطوط الجريان العابرة من **A** إلى **B** انهيارا نحو ثقب أسود ، و الخطوط الأخرى العابرة من **B** إلى **A** تمثل اختفاء ثقب أسود نتيجة التبخر الهوكيني.

وهنا عند هذه النقطة ، لابد لي من إبداء ملاحظة تتعلق بالمعنى المقصود من كلمة " تأرجح" . و لنذكر بهذه المناسبة أقسام الحبحبة الخشنة التي تحدثنا عنها في الفصل السابق ، و التي تعد فيها نقاط الفضاء الطوري التي تنتمي إلى قسم واحد (أو حبابة واحدة) ممثلة لحالة جهرية واحدة (أي لا فرق فيها بين نقطة و أخرى). ولما كان اتباع الأسهم يسير بنا مع تقدم الزمن نحو الأقسام الأكبر فالأكبر ، فالأنطروبية تزداد إذن. وأخيرا تتوه نقطة الفضاء الطوري في أضخم الأقسام كلها أي في القسم الموافق لحالة التوازن الحراري (أو الحد الأعلى للأنطروبية). على أن هذا الوصف لا يصح إلا إلى حد معين. أما إذا انتظر المرء مدة كافية، فمن الجائز عندئذ أن تجد نقطة الفضاء الطوري ***أخيراً*** طريقها إلى قسم أصغر، الأمر الذي يعني تناقص الأنطروبية. و لكن ذلك لن يدوم عادة مدة طويلة (نسبياً)، بل ستعود الأنطروبية حالا أدراجها ثانية للازدياد عند دخول نقطة الفضاء الطوري ثانية إلى القسم الأوسع. و هذا ما عنيناه بالتأرجح و ما يرافقه من تخفيض للأنطروبية. وهو في العادة لا تهبط فيه الأنطروبية كثيرا، ولكن قد يصادف، وهذا نادر جداً، أن يكون التأرجح ***ضخماً*** و أن يتاح للأنطروبية أن تنخفض انخفاضا كبيراً - أو ربما تظل منخفضة لزمن طويل نوعا ما .

إن مثل هذا الانخفاض الكبير الطويل الأمد نسبيا هو ما يلزمنا للانتقال من المنطقة **B** إلى المنطقة **A** عن طريق التبخر الهوكني . أي لابد من حدوث تأرجح كبير، لأن المكان بالتحديد الذي يعبر فيه السهم بين**B** و**A** يجب أن يخترق قسماً صغيراً. و كذلك الأمر حين تكون نقطة الفضاء الطوري موجودة في القسم الرئيسي داخل **A** (الذي يمثل حالة التوازن الحراري من دون ثقوب سوداء)، إذ لابد هنا أيضاً من مرور فترة طويلة قبل أن يحدث انهيار ثقالي و تنتقل النقطة إلى المنطقة **B** ، أي لابد من حدوث تأرجح كبير (إذ لا يمكن الانتقال مباشرة من التوازن الحراري إلى الانهيار الثقالي).

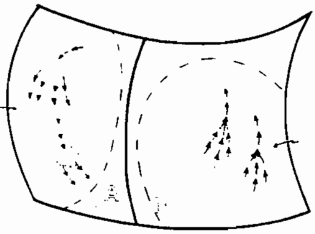
ترى أي الأسهم عددها ***أكبر***، تلك التي تودي من **A** إلى**B** أم التي تودي من**B** إلى **A** ؟ أم أن عدد الأسهم ***واحد*** في الحالين ؟ إن هذه القضية ستكون هامة جداً بالنسبة لنا . و سنعرضها بطريقة أخرى: ترى هل الأسهل للطبيعة أن تحدث ثقبا أسود نتيجة الانهيار الثقالي للجسيمات الحرارية، أم الأسهل أن تتخلص من ثقب أسود عن طريق الإشعاع الهوكني، أم أن الأمرين "بصعوبة " واحدة ؟ وقبل الإجابة عن ذلك دعونا نحدد مسألتنا . إن ما يهمنا ليس عدد الأسهم، بل معدل التدفق من حجم الفضاء الطوري. أي لنتصور أن الفضاء الطوري مليء بسائل من نوعية (كثيرة الأبعاد) غير قابل للانضغاط. عندئذ تمثل الأسهم جريان هذا السائل (و بحسب نظرية ليوفيل، كما نذكر، التي ورد وصفها في الفصل الخامس ص 225) يظل حجم الفضاء الطوري محفوظا في أثناء التدفق، الأمر الذي يكافيء قولنا أن سائل الفضاء الطوري غير قابل فعلاً للانضغاط) أي أن ***نظرية ليوفيل*** تؤكد لنا بأن التدفق من **A** إلى **B** يجب أن يساوي التدفق من**B** إلى **A**، لأن سائل الفضاء الطوري غير قابل للانضغاط. فهو لا يمكن

أن يتجمع في هذا الجانب أو ذلك الآخر . وهكذا يتضح أنـه لابـد أن تكـون " صعوبـة " بنـاء ثقب أسود من إشعاع حراري هي بصعوبة تهديمه نفسها.

وهذا بالفعل هو استنتاج هوكنغ الخاص على الرغم من أنه توصل إلى وجهة النظر هذه معتمـدا على اعتبارات مختلفة عن ذلك إلى حد ما . إذ كانت حجـة هوكنـغ الرئيسـية هـي أن الفيزيـاء الأساسية التي لها صلة بمشـكلتنا هـي فيزيـاء متنـاظرة زمنيـاً (النسـبية العامـة، الترموديناميك، إجراءات ميكانيك الكم الواحدية القياسية)، لذلك إذا جعلنا الزمن يسير إلى الوراء ، فلابد أن نحصل على الإجابة نفسها كما لو جعلناه يتقدم إلى الأمـام . و هـذا يعـني فحسـب أن نعكـس اتجاهات جميع الأسهم في **P** . لذلك نخلص من هذه الحجة أيضا إلى أن عدد الأسهم مـن **A** إلى **B** لابد أن يساوي عدد الأسهم من **B** إلى **A**، بشرط أن تكون المنطقة التي نحصل عليها من **B** إذا عكسنا سير الزمن هي المنطقة **B** نفسها (و بطريقة مماثلـة : أن تكـون المنطقـة الـتي نحصـل عليها من **A** بعكس سير الزمن هي المنطقة **A** نفسها). و يعني هذا الشرط مـا يعنيـه بـالتحديد رأي هوكنغ الجدير بالاهتمـام مـن أن الثقـوب السـوداء و معكوسـاتها الزمنيـة، أعـني الثقـوب البيضاء، هي في حقيقة الأمر متطابقة من الناحية الفيزيائية . وكـانت حجتـه في ذلـك أن حالـة التوازن الحراري يجب أن تكون هي أيضاً متنـاظرة زمنيـاً، مـا دامـت الفيزيـاء المسـتخدمة فيهـا متناظرة زمنياً. وهذه فكرة مذهلـة لا أود أن أدخـل هنـا في نقـاش مفصـل حولها. بـل أكتفـي بالقول إن فكرة هوكنغ تقوم على أنه يمكن اعتبار الإشعاع الكمومي (الهوكني) ــــ بصورة ما ــــ المعكوس الزمني لعملية ابتلاع الثقب الأسود للمادة . ولكن هذا الاقتراح ، على الرغـم مـن أنه فكرة عبقرية، فإنه يتضمن بعض الصعوبات النظرية العسيرة ، حتـى أنـي شـخصياً لا أؤمـن بأنه اقتراح يمكن جعله قابلا للتطبيق العملي.

ومهما يكن من أمر فإن هذا الاقتراح ، في الحقيقة ، لا يتلاءم مع الأفكار التي أطرحها هنـا. لأني حاولت أن أثبت أنه لابد من وجود ثقوب سوداء، بينما ***لا يمكن أن توجد*** ثقوب بيضاء، و ذلك بسبب ***فرضية الانحناء الويلي*** .إذ تدخل هذه الفرضيـة معهـا ***لا تنـاظرا زمنيـاً*** ، الأمـر الذي لم يأبه له هوكنغ . وهنا لابد من الإشارة إلى أنه لما كانت الثقوب السـوداء و شـذوذاتها الزمكانية تحتل فعلا القسم الأعظم من الدراسة التي تتناول ما يحدث داخل علبة هوكنغ، فلابـد أن تؤخذ الفيزياء (المجهولة) التي تتحكم بسلوك هذه الشذوذات بالحسبان.و هنا يأخذ هوكنغ بوجهة النظر القائلة إن هذه الفيزياء المجهولـة يجـب أن تكـون نظريـة كموميـة للثقالـة ***متنـاظرة زمنيـاً*** . في حين أني أنادي بأن هـذه النظريـة ، هـي نظريـة الـــ ث ك ص اللامتناظـرة زمنيـاً. كما أعلن أنه لابـد أن تكـون ف ن و هـي مـن أهـم مقتضيـات ث ك ص (و كذلـك قـانون الترموديناميك الثاني بشكله المعروف لدينا) لذلك لابد لنـا، لأجـل مشـكلتنا الراهنـة، مـن أن نحـاول التحقق من مقتضيات ف ن و. دعونا نرى إذن كيف يؤثر مضمـون ف ن و في مسـألة جريان " سائلنا " غـير القـابل للانضغـاط في **P** . فمـن المعـروف أن الثقـوب السـوداء تقـوم في

الزمكان بامتصاص المادة التي ترتطم بها و تحطمها.و الأهم من هـذا بالنسبة لأهدافنا الراهنة، أنها تهدم ***كذلك كل المعلومات*** ! فيكون نتيجة ذلك أن تندمج بعض خطـوط التدفق معا في **P** (أنظر الشكل 8 ـ 6). وعـندئـذ يمكن لحالتين، كانتا بالأصل مختلفتين،أن تصبحا حالة واحدة حالما تتهـدم المعلومات التي كانت تميز بينهما . لذلك سيحدث لدينا خرق لنظرية ليوفل نتيجة



الشكل 8 ـ 6 : في المنطقة **B** يجب أن تندمج خطوط التدفق معا نتيجة لانعدام المعلومات في شذوذات الثقب الأسود. ترى هل يوازن ذلك خلق خطوط تدفق (بالدرجة الأولى**A**) نتيجة للإجراء الكمومي R ؟

لاندماج بعض خطوط التدفق معا في **P**. " فسـائلنا " إذن ، لن يظل غير قابل للانضغاط ، لأنه سائر باستمرار نحو التلاشي داخل المنطقة **B** !

وهنا يبدو أننا وقعنا في مأزق. لأن سائلنا إذا كان سائراً باستمرار نحـو التلاشـي في المنطقة **B** فلابد عندئذ من أن تكون هناك خطوط تدفق من **A** إلى **B**/***أكثر*** مما يوجد من**B** إلى **A** ـــ لذلك كان خلق الثقب الأسود أسهل في نهاية المطاف، مـن تهديمه ! و هـذا واقع كـان مـن الممكن فهمه لولا أنه يعني عندئذ أن السائل الذي يخرج من المنطقة**A** أكـثر مـن السـائل الـذي يدخل فيها. و لما لم يكن ثمة ثقوب سوداء في **A** ـ كما استبعدت ف ن و وجود ثقوب بيضاء ـ لذلك كان لابد أن تظل فرضية ليوفل سارية بحذافيرها في المنطقة **A** ! إلا أننا بذلك أصبحنا بحاجة للبحث عن وسيلة " لخلق مادة " في**A** لكي تعوض عـن فقدها في **B** . فأي آلية هـذه يمكن أن تزيد عدد خطوط التدفق ؟ وهنا يبدو أن ما نحتاجه هو أنه يمكن لحالة واحـدة بـالذات أن تسفر أحياناً عن أكثر من نتيجة واحدة (أعني تفرع خطوط التدفـق). غير أن هـذا النـوع من الارتياب، المتعلق بتطور منظومة فيزيائية في المستقبل ، يذكر بالنظرية الكمومية ـ الجـزء R منها على الأقل . فيا ترى ، هل من الممكن أن يكون R بمعنـى مـا و (ف ن و) وجهـين لعملة واحدة ؟ ففي حين أن أهمية ف ن و هي أنها تسبب اتحاد خطـوط الجريـان في**B** فـإن الإجـراء الكموميR يسبب تفرع هذه الخطوط في **A**، أي أنني أرى، بالفعل أن ما يسبب تفرع خطـوط الجريان هو سيرورة كمومية ***موضوعية*** لاختزال متجهة الحالة (R) أو أن اتحاد هـذه الخطـوط، نتيجة لـ ف ن و، هو الذي يكافيء هذا التفرع تماما. (الشكل 8 ـ 6).

ولكن لابد لهذا التفرع لكي يحدث من أن تكون R ، كما رأينا سابقاً، لا متناظرة زمنياً. وهذا ما ثبت لدينا كما نذكر في تجربتنا التي كـانت تتضمـن مصباحـا و خلية ضوئية و مرآة

نصف شفافة .إذ كان هناك خياران (باحتمالين متساويين) للمسار الذي يسير فيه الفوتون الصادر عن المصباح بعد ارتطامه بالمرآة، فهو إما أن يصل إلى الخلية الضوئية و تسجل وصوله، و إما أن يصل إلى الحائط A لا تسجل الخلية شيئاً . فلدينا في فضاء الطور الخاص بهذه التجربة خط تدفق يمثل إصدار الفوتون ثم تفرعه إلى خطين، أحدهما يمثل الحالة التي تثار فيها الخلية الضوئية، والآخر يمثل حالة بقائها غير مثارة. ففي هذه الحالة يبدو التفرع حقيقياً أصيلاً، لأن هناك داخلاً واحداً متاحاً، و هناك خارجين ممكنين. أما الداخل الآخر الذي كان من الممكن أن ندخله في حسابنا، فهو إمكان أن يكون الفوتون قد اندفع من حائط المختبر عند B، و في هذه الحالة سيكون هناك داخلان وخارجان. ولكن هذا الإمكان للداخل الآخر (المندفع من الحائط)، سبق أن استبعد بسبب عدم اتساقه مع قانون الترموديناميك الثاني أو ــ من وجهة النظر المعبر عنها هنا ـــ عدم اتساقه مع ف ن و ، عندما نتتبع التطور في اتجاه الماضي.

وأعود الآن فأكرر القول : إن وجهة النظر التي أعبر عنها هنا، هي في الواقع غير " تقليدية " ـ و إن كنت لا أرى بوضوح ما سيقوله فيزيائي " تقليدي " بشأن حل هذه المسائل التي أطرحها هنا. (بل إني أشك في أن يكون عدد الفيزيائيين الذين أولوا هذه القضايا كثيراً من التفكير هو عدد كبير). ولا أنفي أبدا أني استمعت إلى كثير من وجهات النظر المختلفة. فلقد اقترح بعضهم مثلاً، من حين إلى آخر ، بأن الإشعاع الهوكيني لن يسبب اختفاء الثقب الأسود كليا أبدا ، بل ستظل هناك دائما " شذرة " صغيرة . (فلا وجود بعد ذلك، اعتماداً على وجهة النظر هذه، لأسهم من **B** إلى **A**!) هذا رأي لا يختلف كثيرا عن رأيي (بل إنه في الحقيقة يدعمه). و مهما يكن من أمر، فقد كان بالإمكان تجنب هذه النتائج التي وصلت إليها فيما لو فرض أن حجم الفضاء الطوري الكلي**P** هو في واقع الأمر، ***لا نهائي***، و لكن هذا الفرض يتعارض مع بعض الأفكار، الأساسية قطعاً، حول أنطروبية الثقوب السوداء و طبيعة فضاء الطور في حالة منظومة (كمومية) مقيدة داخل حدود و ثمة اعتراضات أخرى وجهت [1] للنتائج التي وصلت إليها، لكنها لا تبدو لي حقيقية. والحقيقة أن الاعتراض الأكثر جدية بكثير هو الاعتراض القائم على المثالية التي يفترض وجودها في بناء علبة هوكنغ نفسه، و بأن بعض الأمور المبدئية قد انتهكت عند افتراضنا لبنائها. و هذا اعتراض لا أستطيع أن أؤكده أو أنفيه، و لكني ميال إلى الاعتقاد بأن من الممكن تقبل هذه المثاليات التي اضطررنا إليها لأنها لا تشكل خطراً على النتائج التي توصلنا إليها .

وهناك أخيراً نقطة مهمة كنت قد مررت عليها مرور الكرام. فقد بدأت في دراستي منطلقاً من أ ن لدينا فضاء طورياً ***كلاسيكياً***، لذلك اعتمدت على نظرية ليوفيل التي تصح في الفيزياء الكلاسيكية. ولكن كان لابد بعد ذلك من أخذ ظاهرة الإشعاع ***الهوكيني*** الكمومية بالحسبان. و الواقع أن ادخال نظرية الكم قد تم قبل ذلك ما دامت ***محدودية الأبعاد*** إضافة إلى محدودية حجم**P** هما نتيجة لنظرية الكم). و قد سبق أن رأينا في الفصل السادس أن المقابل الكمومي

لفضاء الطور هو فضاء هلبرت لذلك كـان يجـب أن نسـتخدم، منـذ البدايـة، وطيلـة المحاكمـة السابقة، ***فضاء هلبرت*** بدلاً من الفضاء الطـوري، و أن نعتمـد عندئـذ علـى نظريـة معروفـة في فضاء هلبرت ، شبيهة بنظرية ليوفل، وهي نظرية تنتج من الطبيعة ***الواحدية*** للتطور U في الزمن. و من الجائز أنه كان ينبغي التعبير عن حجتي بأكملها في إطار فضاء هلـبرت بـدلا مـن الفضـاء الطوري الكلاسـيكي ، ولكـن مـن الصعـب أن نـرى كيـف نعـالج في فضـاء هلـبرت الظـواهـر الكلاسيكية التي تستدعيها هندسة زمكان الثقوب السوداء. لذلك أرى أن النظرية الصحيحة لا يناسبها لا فضاء هلبرت و لا الفضاء الطوري الكلاسيكي ، بل لابد من استخدام فضاء رياضي لم يكتشف حتى الآن هو وسط بين هذين الفضاءين. وعلى هذا، يجب أن تتخـذ حجـتي دافعـاً أو محرضاً، ليس إلا، على الكشف. فهي ***إيحائية*** فقط و ليست استنتاجية. ومهما يكن من أمـر، فإني أؤمن بأنها كانت مناسبة جيدة جداً للتفكير بأن (ف ن و وR)) مرتبطان ارتباطاً وثيقـاً وأن R بالتالي ***لابد أن تكون فعلاً من تأثير الثقالة الكمومية.***

وأعود فأكرر استنتاجاتي : فأنا أضع بين أيديكم اقتراحي القائل إن اخـتزال متجهـة الحالـة الكمومي هو السيرورة المعاكسة (أو المقابلة) لفرضية الانحنـاء الويلـي ف ن و . و علـى هـذا سيكون أول مقتضيات بحثنا عن نظرية الثقالة الكمومية الصحيحـة (أو : ث ك ص) همـا ف ن و ، وR . فالأولى منهـا تـؤدي إلى ***إندماج*** خطـوط التدفـق في فضـاء الطـور، و الثانيـة إلى ***انشطار*** (أو تفرع) مكافىء لهذه الخطوط، و كلا السيرورتين مرتبطتان ارتباطاً وثيقاً بقانون الترموديناميك الثاني.

ولنلاحظ أن اندماج خطوط التدفق يتم كله في المنطقة **B** . في حين أن تفرعها يمكن أن يتم في**A** و في **B**. ولنذكر أيضا أن **A** تمثل غياب الثقوب السوداء. وهكذا يمكـن لاخـتزال متجهـة الحالة أن يتم بالفعل عند غياب الثقوب السوداء . و ليس من الضـروري طبعـا أن يكـون لدينـا ثقب أسود في المخبر الذي نجري فيه التجارب يومياً لكي يحدث R (أي مثلما فعلنـا في تجربتنـا التي رأيناها منذ قليل على الفوتون) . فنحن معنيون هنا فحسب بتوازن عام شـامل بـين أشـياء محتملة يمكن أن تحدث في وضع من الأوضاع . فبحسـب وجهة النظر التي أطرحها هنا، إن مجرد ***إمكانية*** تكون ثقوب سوداء (و من ثم تدمير المعلومـات) في مرحلـة مـا، هـو الـذي يجـب أن يوازنه فقدان الحتمية في النظرية الكمومية.

متى تختزل متجهة الحالة ؟

لنفرض أننا سلمنا اعتماداً على الحجج السابقة بأنه يمكن في نهاية المطاف أن يكون اخـتزال متجهة الحالة ظاهرة ثقالية، فهل من الممكن عندئذ جعل الروابط بين Rو الثقالة أكثر وضوحاً؟ ثم اعتماداً على وجهة النظر هذه، متى يجب أن ***يتم*** انهيار متجهة الحالة ***فعلاً*** ؟

علي أن أشير في بادىء الأمر إلى ما تلاقيه المحاولات الرامية للوصول إلى نظرية ثقالية كمومية، وحتى الأكثر تقليدية منها ، من صعوبات تظهر عند تطبيق مبادىء النسبية العامة على قواعد نظرية الكم. لأن هذه القواعد (ولاسيما تأويل الاندفاع على أنه مؤثر اشتقاق بالنسبة للموضع، و هذا في أساس معادلة شرونغر، أنظر ص 342) لا تتلاءم إطلاقاً مع هندسة الزمكان المنحني. و أنا أرى هنا أنه حالما يتدخل انحناء زمكاني ذو قيمة " معينة "تفشل عندئذ حتماً قواعد الانضمام الخطي الكمومي. إذ تحل هنا محل انضمام السعات العقدية الموافقة لحالات ممكنة مختلفة بدائل فعلية لها احتمالات معينة ــ و أحد هذه البدائل هو الذي ***يتحقق فعلاً***.

ولكن ما الذي أعنيه بقولي انحناء زمكانياً " معيناً " ؟ إنه في رأيي ذلك المستوي الذي يكون قد تم الوصول إليه حين يبلغ قياس الانحناء مرتبة قريبة من ***غرافيتون واحد*** (6) أو أكثر. (فالحقل الكهرطيسي، كما نذكر، مكمم تبعا لنظرية الكم على صورة واحدات فردية تدعى "فوتونات" فعند تحليل الحقل إلى تواتراته الفردية (بموشور مثلاً) نجد أن القسم الذي تواتره υ لا يمكن أن يتجلى إلا على صورة أعداد صحيحة من الفوتونات التي تبلغ طاقة كل منها $h\nu$ فمن المحتمل أن تكون ثمة قواعد مشابهة لهذه تنطبق على الحقل الثقالي). و لما كان الغرافيتون الواحد، تبعاً لنظرية الكم، أصغر واحدة للانحناء يمكن أن يسمح بها، فالفكرة كلها هي أنه يجب، حالما نصل إلى هذا المستوي، تعديل قواعد الانضمام الخطي المألوفة التي تتمشى مع الإجراء U (وذلك لكي تطبق على الغرافيتونات)، فيظهر عندئذ نوع من عدم الاستقرار اللاخطي " غير المتناظر زمنيا ، و يحل محل انضمام الخيارات الخطي العقدي المتواجدة معا باستمرار، إمكان واحد هو الذي يتحقق من دونها كلها ، فتثبت المنظومة على هذا الإمكان و لربما كان اختيار الإمكان يتم بمحض المصادفة أو لربما كان ثمة شيء أعمق خلف هذا الاختيار هو الذي يحدده: والنتيجة هي أن الواقع أصبح الآن إما هذا الشيء ، و إما هذا الآخر، و بذلك يكون قد تم إنجاز الإجراء R .

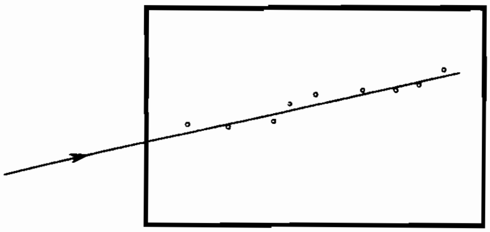
فتبعا لهذه الفكرة، كما يلاحظ، يحدث الإجراء R تلقائياً من دون أي تدخل للإنسان، وبطريقة موضوعية بكل معني الكلمة. و يمكن أن نلخص هذه الفكرة بأن مستوي " الغرافيتون الواحد " لابد أنه يأتي وسطاً بين" المستوي الكمومي " أي مستوي الذرات و الجزيئات .... إلخ، من جهة، (حيث تسري القواعد الخطية (U) في النظرية الكمومية المألوفة سرياناً تاماً)، و" المستوي الكلاسيكي " الذي نعرفه في تجاربنا اليومية من جهة أخرى. فكم يجب أن يبلغ الغرافيتون الواحد إذن ؟ في الحقيقة يجب أن نلح على أن المسألة ليست مسألة ***قدر فيزيائي*** بقدر ما هي مسألة توزع الكتلة و الطاقة. ولقد سبق أن رأينا أن آثار التداخل الكمومي يمكن أن تحدث على مسافات كبيرة، بشرط ألا تكون الطاقة كبيرة (و لنذكر هنا وصفنا لتداخل

الفوتون مع نفسه في ص 306 و تجارب أينشتين و بودولسكي و روزن التي أجراها كلاوزر وأسبيكت ص 340). إن معيار الكم الثقالي المميز هو مايسمى ***كتلة بلانك***، وتساوي تقريباً:

$$m_p = 10^{-5} \text{ grams} \quad (\text{بالغرام})$$

لكن هذا المقدار يمكن أن يبدو للمرء أضخم مما كان يتصور ، لأن هناك أشياء كثيرة ***أصغر*** كتلة من هذا، من ذلك مثلاً ذرات الغبار التي يمكن رؤيتها، و هي تسلك مع ذلك سلوك الأشياء الكلاسيكية المألوف (و الحقيقة أن كتلة بلانك m_p أصغر قليلاً من كتلة برغوث). وبرغم ذلك لا أتصور أن هذا المعيار " غرافيتون واحد " ، يمكن أن يطبق بصورته الفجة هذه كما هي. و لذلك سأحاول أن أستجلي هذا الأمر بعض الشيء. ولكن مسألة معرفة كيف يطبق هذا المعيار بالتحديد لا تزال يحوطها الغموض و الالتباس عند كتابة هذه السطور .

دعونا أولا نتأمل في إحدى الطرق المباشرة التي نشاهد فيها الجسم، و أقصد بذلك استخدام حجرة ***ولسون الضبابية*** . ففي هذه الحالة يكون لدى المجرب حجرة مليئة بالضباب الموشك على التكاثف على شكل قطرات صغيرة جداً. و عندما يدخل في الحجرة جسم سريع مشحون، كان قد انطلق مثلا نتيجة تفكك ذرة نشيطة إشعاعياً كانت موضوعة بالقرب من الحجرة ، يسبب دخوله ، تأين بعض الذرات القريبة من مساره (أي تصبح مشحونة بسبب انتزاع بعض الإلكترونات منها)، فتصبح هذه الذرات مراكزا تكاثف. و تتشكل على طول المسار قطيرات صغيرة من تكاثف البخار. وبهذه الوسيلة يصبح لدينا خط من القطيرات يمكن للمجرب أن يشاهده مباشرة (الشكل 8 ـــ 7).



الشكل 8 ـ 7 : يدخل جسيم مشحون في غرفة ولسون الضبابية و يسبب تكاثف سلسلة من القطيرات

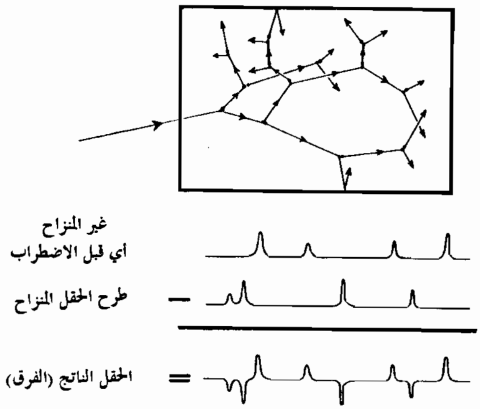
والآن لنحاول إعطاء الوصف الكمومي لهذه الظاهرة . فعندما تتفكك ذرتنا النشيطة إشعاعياً، ينطلق منها جسيم، و يكون أمام هذا الجسيم اتجاهات مختلفة عديدة يمكنه أن يسير فيها ، فثمة سعة لهذا الاتجاه، وسعة أخرى لذلك الآخر، وسعة لكل اتجاه غيرهما. وتتواجد هذه الاتجاهات والسعات كلها معاً في آن واحد في حالة انضمام كمومي خطي، فيكون هذا الكل المنضم من الخيارات بمجموعه موجة كروية تنبعث من الذرة المتفككة هي دالة الموجة للجسيم المنطلق. و لدى دخول كل جسيم في الغرفة الضبابية، تنشأ بجانبه و على طول مساره

سلسلة من الذرات المؤينة التي سرعان ما تصبح مراكز لتكاثف البخار. و لابد أن تتواجد معاً أيضاً هذه السلاسل المختلفة الممكنة من الذرات المؤينة في صورة انضمام كمومي خطي، وهكذا يصبح لدينا عندئذ انضمام خطي لعدد ضخم من سلاسل القطيرات المتكاثفة ***المختلفة***. وفي مرحلة معينة يصبح هذا الانضمام الخطي الكمومي العقدي مجموعة من الخيارات الفعلية التي احتمالاتها أعداد حقيقية، نظراً لأن طويلات السعات الكمومية العقدية يجب أن تربع وفقاً للإجراء R. ولكن لا يتحقق في عالم التجربة الفيزيائية ***الفعلية*** سوى ***واحد*** من هذه الخيارات. وتحدث هذه المرحلة، تبعاً لوجهة النظر التي أقترحها، حالما يبلغ الفرق بين الحقول الثقالية لمختلف الخيارات مستوي غرافيتون واحد.

وأما متى يحدث ذلك فقد بينت حسابات أولية جدا (7) أنه إذا وجدت قطيرة ***واحدة*** فحسب مكتملة التكوين الكروي ، فإن الوصول إلى مرحلة الغرافيتون الواحد يتم حين تنمو كتلة هذه القطيرة إلى ما يقرب من جزء من مئة من m_p، وهذه كتلة تساوي جزءا من عشرة ملايين من الغرام . و لكن هذه الحسابات تحوي مواضع ارتياب عديدة (إضافة إلى صعوبات تتعلق بالمبدأ). و لكن على الرغم من أن النتيجة أكبر قليلاً من أن يركن إليها ، فهي ليست مرفوضة كلياً . و لكننا نأمل بالوصول عما قريب إلى نتائج أدق، وأن نتمكن عندئذ من معالجة سلسلة القطيرات كلها دفعة واحدة بدلا من معالجة قطيرة واحدة بمفردها. كما يمكن أن نتبين وجود بعض الفروق الملموسة حين نأخذ في الحسبان حقيقة أن القطيرات تتكون من عدد هائل جدا من الذرات الضئيلة بدلا من اعتبارها منتظمة التكوين كلياً .أضف إلى هذا أن المعيار الذي يحدد مستوى " الغرافيتون الواحد " يجب أن يتم تحديده بدقة أكبر بكثير من الناحية الرياضية.

فما درسته في هذا الوضع أعلاه هو كيف يمكن أن يكون الرصد الفعلي سيرورة كمومية (وهي تفكك ذرة نشيطة إشعاعياً). فقد ضخمت فيها الآثار الكمومية لدرجة أن مختلف الخيارات الكمومية أحدثت إمكانات جهرية مختلفة أمكن مشاهدتها مباشرة. و في رأيي أن R يمكن أن تتحقق تحقيقا موضوعيا حتى حين لا يكون هناك تضخيم جلي .و لبيان ذلك لنفرض أن جسيمنا قد دخل في علبة كبيرة مليئة بالغاز (أو السائل) بدلا من دخوله في حجرة الضباب، و أن كثافة هذا الغاز كبيرة لدرجة أنه يكاد يستحيل عمليا ألا يصطدم الجسيم بعدد كبير من ذراته، أو إن شئت، يثير فيها الاضطراب، و الآن دعونا ننظر في حالة خيارين فحسب للجسيم باعتبارهما جزءا من الانضمام الخطي العقدي الإبتدائي : فإما أن الجسيم لا يدخل أبدا في العلبة ، أو يدخل على طول مسار خاص حتى يرتد بعد اصطدامه باحدى ذرات الغاز . و في هذه الحالة تأخذ ذرة الغاز هذه بالحركة بسرعة ما كانت لتتحرك بها لو لم يسع الجسيم مسرعا إليها. و ستصطدم مرتدة هي نفسها بذرة أخرى من ذرات الغاز . وهكذا تتحرك الذرتان بطريقة، ما كان من الممكن أن تتحركا فيها بوسيلة غيرها . و يتولد حالا شلال من

حركات الذرات في الغاز ما كان من الممكن أن يحدث لو لم يدخل الجسيم في بادىء الأمـر في العلبة (انظر الشكل 8 ــ 8) و لن يمر وقت طويل إلا و تكـون جميـع ذرات الغـاز عمليـا قـد تعرضت للاضطراب.



الحقول الثقالية للجسيمات في مخطط أولي

الشكل 8 ــ 8 : إذا دخل جسيم في علبة كبيرة مليئة بغاز ما ، فلن يمر وقت طويل حتى تتعرض كل ذرة في الغاز للاضطراب، فالانضمام الكمومي الخطي لجسيم دخل في العلبة و لجسيم لم يدخل فيها ، يتضمن إذن انضماما خطيا لهندستين زمكانيتين مختلفتين تصفـــان الحقليـــن الثقـاليـــن لوضعين من أوضاع جســـيمات الغـــاز. فيا ترى متى يبلغ الفـــرق بين هاتين الهندســـتين مســـتوى" غرافيتون واحد " ؟

والآن لنفكر كيف يمكن أن نصف هذه العملية بطريقة كمومية. ففي البداية لا يكون لدينـا سوى الانضمام الخطي المتعلق بالجسيم الأصلي، و المؤلف من حالات مختلـف مواضـع الجسـيم الممكنة ـ باعتبارها جزءا من دالة الموجة للجسـيم. و لكننـا سـنجد بعـد فـترة قصـيرة أن ذرات الغاز كلها أصبحت مشاركة في العملية فلننظر الآن في الإنضمام الخطي العقدي لمسارين يمكـن أن يسير فيهما الجسيم لحظة وصوله إلى العلبة، أحدهما بدخل العلبة، والآخر لا يدخلها وتبعـاً لميكانيك الكم السائد يجب توسيع هذا الانضمام بحيـث يشـمل ذرات الغـاز بأكملهـا : أي أن علينا أن نضم حالتين تكون ذرات الغاز كلها في إحداهما منزاحـة بالنسـبة لمواضعهـا في الحالـة الأخرى. و الآن، لننظر في *الفرق* بين حقلي الثقالة لإجمالي كل من الذرات الفردية في كل مـن هاتين الحالتين.

وعلى الرغـم من أن التوزع *الإجمالي* للغاز هو عمليـاً واحـد في الحـالتين اللتـين سـنضمنهما (كما أن الحقلـين الثقـاليين الإجمـاليين سـيكونان متطـابقين عمليـاً)، إلا أننـا، إذا *طرحنـا* أحـد الحقلين من الآخر نحصل على الفرق (الكثير التغير، انظر الشكل 8 ــ 8) الـذي يمكـن جـداً أن يكون فرقاً ملموساً بالمعنى الـذي عنيتـه هنـا ــ أي حـين يبـلغ مستوي " غرافيتـون واحـد " و عندئذ، اي حالما يصل الفرق إلى هذا المستوي، يحدث اختزال متجهة الحالة . و تكـون النتيجـة

في حالة الجملة الراهنة، إما أن يكون الجسيم قد دخل في العلبة، أو لم يدخل . و بذلك يكون قد اختزل الانضمام الخطي العقدي إلى خيارين مثقلين بوزن إحصائي لا يتحقق إلا واحد منهما بالفعل.

لقد اتخذنا إذن ، من حجرة الضباب في المثال السابق ، طريقة للتوصل إلى رصد حادث كمومي . و لكن يبدو لي أن هناك على الأرجح وسائل رصد أخرى (كالصفائح الفوتوغرافية وحجرة الشرارات ... إلخ) يمكن معالجتها باستخدام معيار " الغرافيتون الواحد " و محاولة تفسيرها بالطريقة التي بينتها أعلاه في حالة علبة الغاز. فهناك الكثير مما يمكن عمله في هذا المجال لكي نرى كيف يمكن تطبيق هذه الطريقة بالتفصيل.

لذلك لا تزال هذه الفكرة إلى الآن مجرد بذرة لما أعتقد أنه سيكون نظرية جديدة نتمنى الوصول إليها (8) ولكنني أعتقد أن أية نظرية لابد أن تتضمن ، لكي تكون مرضية تماماً، بعض الأفكار الجديدة الجذرية جداً حول طبيعة هندسة الزمكان، بل يرجح أن تتضمن وصفاً أساسياً لا محلياً للأمور (9). ويدفعنا إلى هذا الاعتقاد نتائج التجارب من النوع EPR (انظر ص 333)، ففي هذه التجارب يمكن أن يؤدي الرصد (وهو هنا تسجيل الفوتون في الخلية الضوئية) في أحد طرفي غرفة إلى الاختزال ***المتزامن معه*** لمتجهة الحالة في الطرف الآخر ... و لكن بناء أية نظرية حول اختزال متجهة الحالة، تتسق مع روح النظرية النسبية، و تكون في الوقت نفسه موضوعية مئة بالمئة، هو و لاشك تحد جوهري، لأن " التزامن " مفهوم غريب عن النسبية، ويتوقف فيها على حركة الراصد. لذلك ، و هذا رأيي أنا ، يتوقع لتصورنا الحالي لواقع الفيزياء و لاسيما المتعلق فيها بطبيعة ***الزمن***، أن يتعرض لهزة عنيفة جداً ــ قد تتجاوز حتى تلك التي حدثت سابقا في أيام النسبية و ميكانيك الكم.

ومهما يكن من أمر ، فلابد من العودة إلى مسألتنا الأصلية : ترى ما علاقة ذلك كله بالفيزياء السائدة في أعمال دماغنا ؟ وماذا يمكن أن تكون صلتها بأفكارنا و مشاعرنا ؟ لا شك أن كل محاولة للإجابة عن ذلك، تحتاج أولا إلى دراسة شيء عن كيفية بناء دماغنا. و سأعود فيما بعد إلى ما أعتقد أنه المسألة الأساسية، و هي: ما نوع السلوك الفيزيائي الجديد الذي يرجح أنه صاحب الشأن في دماغنا عندما نفكر أو ندرك عن وعي ؟

الملاحظات

1 - نذكر من هذه التعديلات الشائعة لنظرية أينشتين : (1) تغيير معادلة أينشتين الحالية RICCI=ENERGY (بوساطة " لاغرانجيات " أعلى مرتبة). (2) تغيير عدد أبعاد الزمكان من أربعة إلى عدد أكبر (كما هو الحال فيما يدعى " نموذج نظريات كالوزا – كلاين ") (3) إدخال " تناظر فائق " (و هي فكرة مقتبسة من السلوك الكمومي للبوزونات والفرميونات، ومدموجة في مخطط شامل و مطبقة على إحداثيات الزمكان، ولكن ليس بصورة منطقية كلها معا) (4) نظرية الأوتار (و هي نظرية جذرية شائعة جدا الآن تستبدل فيها "تواريخ الأوتار " بخطوط الكون ـــ و هي تدمج عادة مع التعبير (2) و (3) . على أن جميع هذه المقترحات، على الرغم من شيوعها و عرضها القوي ، لاتزال حتماً : " **تلمسية** المرتبة "، TENTATIVE (بالمصطلح الذي بيناه في الفصل الخامس) .

2 - لا شك أن الخواص التناظرية ، المتوافرة في نظرية كمومية ، لا تظل على حالها نتيجة لإجراءات الاستكمام . (راجع Treiman 1985 ، Ashtekar و آخرون 1989). ولكن الأمر يتطلب هنا أكثر من هذا، إن المطلوب هنا هو أن تخرق التناظرات الأربعة التي يشار إليها عادة بـــT وPT وCT وCPT ، كلها معاً ـــ وهذا ما لا تستطيع إجراءات الاستكمام أن تقوم به (ولاسيما ذاك المتعلق بالتناظر CPT).

3 - مهما كان بمقدوري أن أبرز وجهة نظر من هذا النوع، فهي تظل متضمنة في اقتراحات هوكنغ الحالية لتفسير هذه الأمور تفسيراً ثقالياً كمومياً (هوكنغ 1987 ، 1988). و قد تكون الفرضية التي تقدم بها هارتل Hartle وهوكنغ (1984) عن أصل ثقالي كمومي للحالة الإبتدائية، هي ما يمكن أن يوفر جوهرا نظرياً للشرط الإبتدائي WEYL = 0 ، ولكن لا يزال(في رأيي) ثمة شيء من اللاتناظر الزمني ***الأساسي*** غائباً إلى الآن في هذه الفرضيات.

4 ـ تبدو هذه الحقائق أكثر وضوحاً إلى حد ما في عبارات عملية الجداء السلمي $<\chi \mid \psi>$ التي أشير إليها في الحاشية 6 ، في الفصل السادس. فنحن نحسب الاحتمالP، في الوصف الذي يجري فيه الزمن في الاتجاه العادي، بالعبارة:

$$P = |<\psi|\chi>|^2 = |<\chi|\psi>|^2$$

ونحسب الاحتمال P′ في الوصف الذي يجري فيه الزمن بصورة معكوسة بالعبارة:

$$P' = |<\psi'|\chi'>|^2 = |<\chi'|\psi'>|^2$$

وينتج تساوي P و P′ من أن < ψ| χ > = < ψ′| χ′ > وتعني هذه المساواة ما نعنيه أساساً "بالتطور الواحدي."

5 ـ قد يعاني بعض القراء من البلبلة في فهم ما يمكن أن نعنيه بسؤالنا : ما احتمال حدوث حادث مضى إذا علمنا بوقوع حادث آخر في المستقبل ؟ إلا أنه لا توجد مشكلة أساسية في ذلك. بل يكفي أن نتصور أن تاريخ الكون بأكمله مخطط على الزمكان. فلكي نحسب احتمال حدوث p مع العلم أن q يحدث، نتصور أننا درسنا كل توقعات حدوث q، و حسبنا منها الجزء المصحوب بحدوث p فتكون هذه النسبة هي الاحتمال المطلوب و ليس مهما أن يكون q هو حادث يحدث عادة قبل p أو بعدها زمنيا.

6 ـ هذه الغرافيتونات يجب أن تترك لما يدعى ***الغرافيتونات الطولانية*** ـ وهي الغرافيتونات "الافتراضية" التي تؤلف حقل ثقالة ساكن. ولكن توجد لسوء الحظ مسائل نظرية تتصل بتعريف مثل هذه الأشياء تعريفا واضحا و بطريقة رياضية "ثابتة."

7 ـ لقد أدخل أشتكار كثيرا من التحسينات على حساباتي الأصلية الأولية لهذه القيمة ، و أنا أستعمل هنا القيمة التي وجدها (أنظر بنروز 1987 a). إلا أنه أكد لي بأن هناك عددا كبيراً من الخيارات في بعض الفروض التي استخدمت في هذه الحسابات. لذلك لابد من التزام جانب الحذر الشديد عند تبني القيمة الناتجة منها لهذه الكتلة.

8 ـ لقد ظهرت من حين إلى آخر في أدبيات الفيزياء محاولات عديدة لإعطاء نظرية موضوعية لاختزال متجهة الحالة. وكان أنسبها محاولات كاروليهازي **Karolyhazy** (1974) ثم كاروليهازي و فرنكل و لوكاس معا (1986) ، ثم كومار (1969) **Komar** وبيرل **Pearle** (1985, 1988) وجيراردي **Ghirardi** و ريمي **Rimini** و فيبر **Weber** معاً (1986).

9 ـ لقد أوليت أنا نفسي على مر السنين اهتماما في نظرية الأوتار و حاولت تطوير نظرية لا محلية (لا موضعية) للزمكان، وكان الدافع لذلك إلى حد كبير اتجاهات أخرى استندت إليها مثل نظرية اللاويات " Twistor Theory (انظر بنزوز و رندلر **Penrose and Rindler 1986** و كذلك هجت **Hugget** و تود **Tod** 1985، ووارد **Ward** وويلس **Wells** 1989 وعلى رغم ذلك لا تزال هذه النظرية مفتقرة في أحسن الأحوال إلى بعض المقومات ليس من المناسب أن ندخل هنا في مناقشتها.

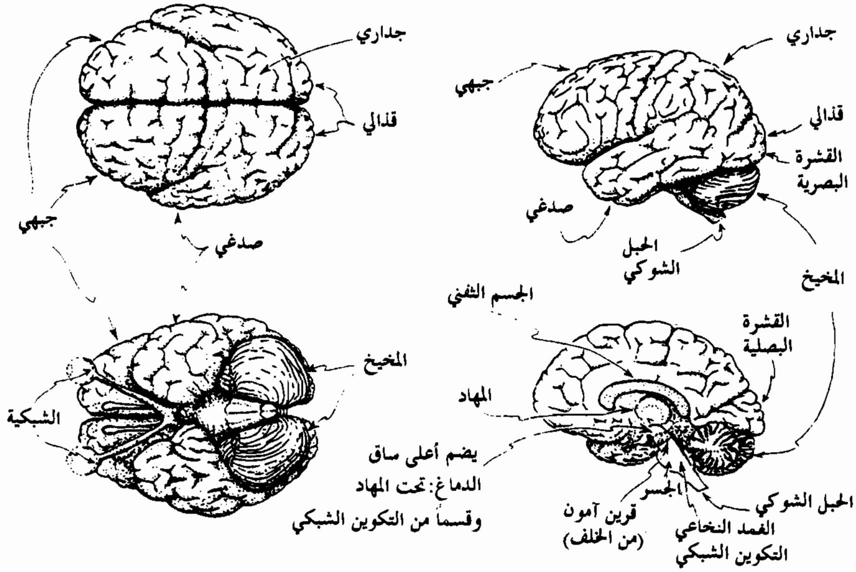
الفصل التاسع

الأدمغة الحقيقية و نماذجها

ماذا تشبه الأدمغة حقيقة ؟

ذكر آلان تورنغ مرة (1) أن ليس في العالم شيء يشبه أدمغتنا مثل كرة من العصيدة الباردة، و على رغم ذلك يتكون هذا الذي في رؤوسنا من بنية رائعة تضبط أفعالنا و تبعث فينا،بطريقة أو بأخرى، وعياً بالعالم المحيط بنا، حتى ليصعب علينا أن نفهم كيف يمكن لشيء له مثل هذا المظهر القميء أن ينجز الأعاجيب التي نعرف حقا أنه قادر على فعلها. ولكن فحصه عن كثب يكشف مقدار ما في بنيته من تعقيد كبير وتعض متشابك الصنعة والتنظيم (الشكل 9 — 1). فقسمه العلوي الكثير التلافيف الذي يطلق عليه اسم المخ cerebrum (وهو الأكثر شبهاً بالعصيدة) مقسوم بكل وضوح إلى ما تحت وسطه إلى نصفين : نصف كرة المخ الأيسر، ونصف كرة المخ الأيمن، كما أن قسميه الأمامي و الخلفي يميز فيهما، و لكن بوضوح أقل بكثير، فص جبهي frontal lobeو ثلاثة فصوص أخرى هي : الجداري parietal و الصدغي temporal والقذالي occipital . ويأتي في الخلف إلى الأسفل تماماً جزء صغير من الدماغ، كروي الشكل إلى حد ما ـ لعله يشبه كرتين من الصوف ـ هو المخيخ cerebellum . ويوجد في العمق إلى الداخل، عدد من البنى المختلفة الغريبة المعقدة المظهر التي تكاد تكون مختبئة تحت المخ هي الجسرpons (جسر فارولي) و الغمد النخاعيmedulla (.بما في ذلك التكوين الشبكي reticular formation و هي منطقة سنهتم بها فيما بعد) و تؤلف كلها معا جذع الدماغbrain - stem و المهاد thalamus و تحت المهاد hypothalamus و الحصين (قرين آمون) hyppocampus والجسم الثفني (أو الجاسيء) corpus callosum وكثير غيرها من البنى الغريبة ذات الأسماء الشاذة .

إن الجزء الذي تشعر الكائنات البشرية بأنها **تسمو به على الجميع** هو المخ — إذ ليس هذا أكبر الأجزاء فحسب في دماغ الإنسان، بل إن نسبته إلى دماغه بأكمله أكبر مما هي عليه عند سائر الحيوانات الأخرى. (كما أن المخيخ عند الإنسان أكبر أيضاً مما هو عند معظم الحيوانات). وللمخ و المخيخ طبقات سطحية خارجية رقيقة نسبياً مؤلفة من مادة ***سنجابية*** ،كما أن لهما مناطق داخلية أسمك من السابقة مؤلفة من مادة بيضاء. و يطلق على منطقتي المادة السنجابية على التوالي ***القشرة الدماغية*** cerebral cortex ***والقشرة المخيخية*** cerebellar cortex. ويبدو أن مختلف المهام الحسابية تنجز في هذه المادة السنجابية. في حين أن المادة



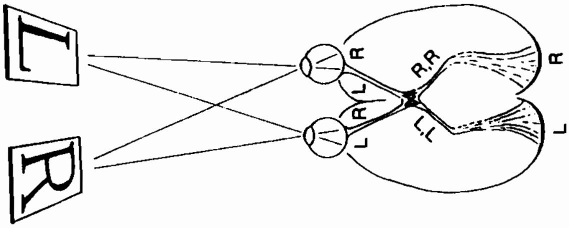
الشكل 9 ـ1: دماغ الإنسان، صورة من أعلاه، من جانبه، من تحته، مقطع نصفي طولاني

البيضاء تتألف من ألياف عصبية طويلة تحمل الإشارات من أحد طرفي الدماغ إلى الآخر.

وتختص أقسام القشرة الدماغية بوظائف نوعية جداً خاصة بها. فالقشرة البصرية visual cortex (وهي منطقة تقع في الفص القذالي و في الخلف تماما من الدماغ) تعنى باستقبال الرؤية و تأويلها. و من الغريب فعلاً أن تختار الطبيعة هذه المنطقة لتؤول فيها الإشارات الواردة من العينين اللتين تقعان ـ عند الإنسان على الأقل ـ في ***مقدمة*** الرأس مباشرة ! غير أن الطبيعة تتصرف بطرق أغرب أيضا من هذه ذاتها. فنصف كرة المخ ***الأيمن*** مسؤول بلا استثناء تقريبا عن القسم الأيسر من الجسم، في حين أن النصف ***الأيسر*** من المخ مسؤول عن القسم الأيمن من الجسم ـ فمن الوجهة العملية، لابد أن تتصالب الأعصاب متجهة من جانب إلى آخر حين تدخل الدماغ أو تخرج منه ! أما في حالة القشرة البصرية فلا يرتبط جانبها الأيمن بالعين اليسرى، وإنما يرتبط ***بالمجال الأيسر من الرؤية لكلتا العينين*** كما ترتبط القشرة البصرية اليسرى بالمجال الأيمن من الرؤية لكلتا العينين. و هذا يعني أن أعصاب الجانب الأيمن من الشبكية في كل عين يجب أن تكون متجهة إلى القشرة البصرية اليمنى، و أعصاب الجانب الأيسر من الشبكية في كل عين تتجه إلى القشرة البصرية اليسرى. (إذ إن صورة الجسم على الشبكية تكون مقلوبة كما نذكر،أي أعلاها إلى أسفل و بالعكس، و أيمنها إلى أيسر

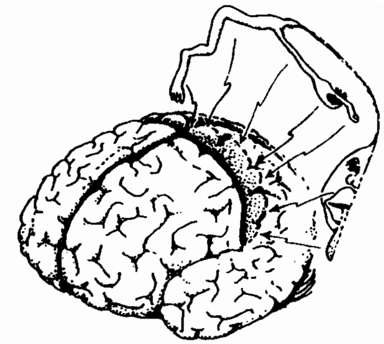
وبالعكس. أنظر الشكل 9 ـــ 2). وبهذه الطريقة تتكون على القشرة البصرية اليمنى خارطة حسنة التحديد لحقل الرؤية الأيسر، وخارطة أخرى لحقل الرؤية الأيمن على القشرة البصرية اليسرى .

وتسير الإشارات الآتية من الأذنين أيضاً إلى التصالب متجهة بالطريقة نفسها إلى الجانب المقابل من الدماغ. فتعالج القشرة السمعية اليمنى (التي تؤلف جزءاً من الفص الصدغي الأيمن) الأصوات القادمة من اليسار بالدرجة الأولى، و تعالج القشرة السمعية اليسرى إجمالا الأصوات القادمة من اليمين. و لكن يبدو أن الشم هو الاستثناء لهذه القواعد العامة. فالقشرة الشمية اليمنى الموجودة في مقدمة المخ (أي الفص الجبهي ـ الذي هو نفسه مهيأ لمجال الحس) تعالج أكثر ما تعالج المنخر الأيمن و القشرة اليسرى المنخر الأيسر .

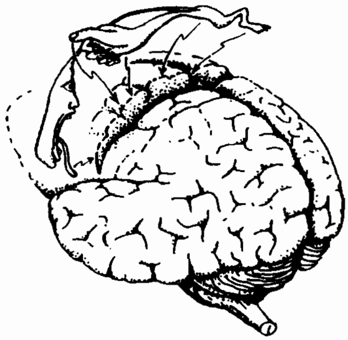


الشكل 9 ـــ 2 : يرتسم حقل الرؤية الأيسر (L) في كلتا العينين على القشرة البصرية اليمنى (R) و يرتسم حقل الرؤية الأيمن (R) في كلتيهما على القشرة اليسرى (L) (منظر من تحت . و لنلاحظ أن الصور على الشبكية مقلوبة)

وترتبط إحساسات اللمس بإحدى مناطق الفص الجداري التي تعرف باسم قشرة الإحساس الجسدي somatosensory cortex ، وهي تقع خلف الحد الفاصل تماما بين الفصين الجبهي والجداري ، و تختص كل منطقة منها بجزء من سطح الجسم و تربطها به علاقة حد نوعية. ويلجؤون أحياناً إلى توضيح هذه الرابطة بيانياً برسم ما يعرف " بقزم ***الإحساس الجسدي"*** وهي صورة لإنسان مشوه ممتد على طول قشرة الإحساس الجسدي كما هو مبين في الشكل 9–3 حيث تعالج قشرة الإحساس الجسدي اليمنى الإحساسات القادمة من الجانب الأيسر من الجسم. و تعالج اليسرى الجانب الأيمن منه. وثمة منطقة من الفص الجبهي تمتد تماما أمام الحد الفاصل بين الفصين الجبهي و الجداري، وتعرف باسم ***القشرة المحركة*** motor cortexو هي مسؤولة عن إطلاق ***الحركة*** في الأجزاء المختلفة من الجسم، أي أن هناك رابطة تقابلية وتخصصية أيضاً بين مناطق هذه القشرة و مختلف عضلات الجسم. فلدينا هنا أيضاً " قزم تحريكي" يوضح هذا التقابل التخصصي، و هو ممثل في الشكل 9 ـــ 4، حيث تشرف القشرة المحركة اليمنى على الجانب الأيسر من الجسم، و القشرة اليسرى على الجانب الأيمن منه.



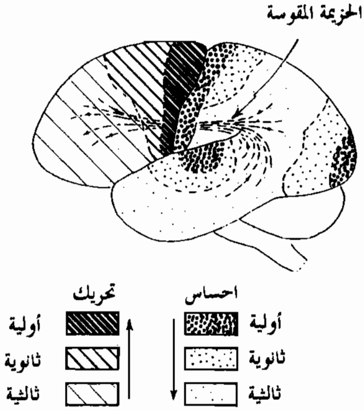
الشكل 9 ـــ 3 : يوضح " قزم الإحساس الجسدي " في هذا المخطط أجزاء المخ الواقعة تحديدا خلف الحد الفاصل بين الفصين الجبهي و الجداري، والتي هي أكثر الأجزاء مسؤولية عن حاسة اللمس في مختلف أقسام الجسم



الشكل 9 ـــ 4 : يوضح " القزم التحريكي " أجزاء المخ التي تقع بالتحديد أمام الحد الفاصل بين الفصين الجبهي و الجداري، والتي هي أكثر الأجزاء فعالية في تنشيط حركة أجزاء الجسم المختلفة مباشرة

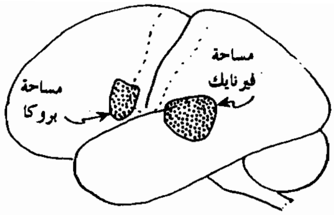
تدعى مناطق القشرة المخية التي تسمى كل منها بحسب اختصاصها المناطق ***الأولية*** primary (كالقشرة البصرية و السمعية و الشمية و قشرة الأحاسيس الجسدية و القشرة المحركة) لأنها هي المعنية مباشرة أكثر من كل ما عداها بمدخلات الدماغ و مخرجاته. وتقع المناطق الثانوية من قشرة الدماغ بجانب المناطق الأولية، وهي التي تعنى بالمستويات المجردة الأكثر تعقيداً ورهافة، (أنظر الشكل 9 ـــ 5) . و تعالج المعلومات الحسية التي تتلقاها القشرة البصرية و القشرة السمعية و قشرة الإحساس الجسدي عند المناطق الثانوية المرافقة. أما المنطقة الثانوية المحركة فتعنى بالخطط المصممة للحركة التي تضع القشرة الأولية كل خطة منها في اتجاهها المختص بالنسبة لحركة العضلة الفعلية. و إذا استبعدنا القشرة الشمية من اعتباراتنا لأنها تسلك سلوكاً مغايراً، أو بالأحرى تبدو معرفتنا بها لا تزال قليلة ، فإن ما بقي من مناطق

القشرة المخية يعرف باسم المنطقة ***الثالثية*** (أو قشرة ***التجميع*** association cortex) ففي هذه المنطقة ــ بالتعاون، إلى حد ما ، مع النهايات العصبية ــ ينفذ النشاط الأكثر تجريداً وتعقيداً، و يتم التأليف بين المعلومات الواردة من مختلف مناطق الإحساس و تحليلها بطريقة معقدة جداً، ويُحتفظ بالذكريات، وتُبنى صور العالم الخارجي، كما يتم تصور الخطط العامة وتقويمها ويُفهم الكلام و تتم صياغته.



الشكل 9 ــ 5 : عمل المخ في مخطط تفصيلي غير دقيق : تدخل المعطيات الحسية الخارجية عند مناطق الإحساس الأولية. ثم تعالج في مناطق الإحساس الثانوية و الثالثية على درجات متتابعة من التعقيد و الصنعة ، وتتحول من ثم إلى المنطقة المحركة الثالثية، وأخيراً تتم تنقيتها على صورة تعليمات واضحة عن نوع الحركة في مناطق التحريك الأولية.

وللكلام أهمية خاصة، لكونه، بحسب الاعتقاد الشائع، ظاهرة ينفرد بها ذكاء الإنسان. والطريف في الأمر أن ***مراكز الكلام*** تقع مبدئياً في ***الجانب الأيسر*** تماما من الدماغ (و هذا على الأقل عند الأشخاص الأيمنيين أي الغالبية الواسعة، و كذلك عند معظم الأشخاص الأعسريين) . و المساحتان الأساسيتان (المختصتان بالكلام) هما : مساحة بروكا Broca's area و هي منطقة تقع في الجزء الخلفي السفلي من الفص الجبهي، ومنطقة أخرى تدعى مساحة ***فيرنايك***، Wernicke's area و تقع في الجزء الخلفي العلوي من الفص الصدغي و حوله (الشكل 9 ــ 6). و تهتم مساحة بروكا بصياغة الجمل، أما مساحة فيرنايك فتهتم بفهم اللغة. لذلك يضعف الكلام عند وقوع تلف في مساحة بروكا و يظل الفهم على حاله ، في حين يظل الكلام سلسا عند وقوع تلف في مساحة فرنايك، و لكن يضعف جدا مضمونه. والمساحتان ترتبطان بحزمة عصبية تدعى الحزيمة المقوسة arcuate fasciculus، التي لا يؤدي تلفها إلى إضعاف الفهم، أو الكلام الذي يظل سلساً، و لكن الفهم لا يمكن التعبير عنه بالكلام



الشكل 9 ـــ 6 : لا يقع على الجانب الأيسر عادة سوى مساحة فرنايك المعنية بالفهم و مساحة بروكا المعنية بالكلام

وهكذا أصبح بإمكاننا الآن أن نكون صورة فجة جدا لما يفعله الدماغ على النحو الآتي: تأتي مدخلاته من إشارات بصرية و سمعية و لمسية و غيرها، و تسجل أول الأمر في المخ في الأجزاء الأولية (الواقعة أساساً) في الفصوص ***الخلفية*** (و هي الجداري و الصدغي و القذالي). ***أما مخرجاته*** التي تكون على صورة دافع لحركات الجسم، فتنجز بصورتها الأساسية في الأقسام الأولية من الفصوص ***الجبهية*** من الدماغ . و يتم بين الإثنين نوع من المعالجات المتعاقبة. فثمة إذن ، بوجه عام ، تحرك لنشاط الدماغ يبدأ عند الأقسام الأولية من الفصوص الخلفية، ثم يتابع مسيره إلى الأقسام الثانوية حالما يتم تحليل قائمة المدخلات، وعندئذ يتابع تحركه نحو الأقسام الثالثية من الفصوص الخلفية عندما تصبح هذه المعطيات مستوعبة كليا (كما هو الحال عند فهم الكلام في مساحة فرنايك). وعندئذ تحمل الحزيمة المقوسة ـ أي شريط الألياف العصبية التي ورد ذكرها أعلاه، ولكن التي تقع هنا في طرفي الدماغ ـ هذه المعلومات المعالجة إلى الفص الجبهي ، حيث تصاغ في المنطقة الثالثية الخطط العامة للأفعال (أي كما هو الحال عند صياغة الكلام في مساحة بروكا). ثم تتم في منطقة التحريك الثانوية ترجمة هذه الخطط العامة للأفعال إلى تصورات أكثر تخصصا و تحديدا عن حركات الجسم ، و من ثم يتحرك نشاط الدماغ نحو قشرة التحريك الأولية حيث تطلق الإشارات أخيراً إلى مختلف فئات العضلات في الجسم (وغالباً إلى العديد منها مرة واحدة) .

فهذه الصورة التي عرضت أمامكم تبدو صورة لآلة حاسبة رائعة ، سيجد فيها مساندو الذكاء الاصطناعي القوي (راجع الفصل الأول و مابعده) داعما رائعا لفكرتهم بأن الدماغ حاسوب خوارزمي ـ أي آلة تورنغ فعلية ـ له مدخل (مثل شريط مدخل آلة تورنغ على اليسار) و له مخرج (مثل شريط مخرج آلة تورنغ على اليمين) و أن جميع الحسابات المعقدة تنفذ فيما بينهما. على أن الدماغ يستطيع طبعا أن يواصل نشاطه وحده بمعزل عن المدخلات الحسية الخاصة، و هذا ما يحدث عند مجرد التفكير أو الحساب أو التأمل بعمق في ذكريات الماضي. ولا تتعدى هذه الأنواع من نشاط الدماغ ، بالنسبة لمؤيدي الذكاء الاصطناعي القوي،

كونها امتدادا للنشـــاط الخوارزمي، بل ربما قالوا إن ظاهرة " الوعي " تظهر متى ما بلـغ مثـل هذا النشاط الداخلي مستويا كافيا مـــن التعقيـد .

وعلى رغم ذلك يجب ألا نتسرع أكـثر مـن الـلازم بـاللجوء إلى التفسـيرات الجـاهزة. ومـا الصورة العادية التي قدمناها أعلاه لنشاط الدماغ سـوى صـورة فجـة جـداً. ففـي المقـام الأول، ليس استقبال الرؤية محدداً بـالصورة الدقيقـة الـتي عرضتهـا. إذ يبـدو أن هنـاك عـددا آخـر مـن المناطق المختلفة (و إن تكن أصغر) من القشرة الدماغية رسمت فيهـا خرائـط لمجـال الرؤيـة، و لأغراض أخرى متنوعة كما يبدو (و يبدو أن وعينا للرؤية يتغير بحسب اختلافها) كمـا يبـدو أن هناك مناطق حسـية و حركيـة أخـرى ثانويـة (أو رديفـة) موزعـة علـى القشـرة الدماغيـة (فحركات العين مثلاً يمكن أن تحرض من نقاط مختلفة في الفصوص *الخلفية*) .

ثم إني لم أذكر في وصفي أعلاه أدوار أقسام أخرى من الدمـا غ غـير المـخ . فمثـلاً مـا دور المخيـخ ؟ إنـه مسـؤول ظاهريـا عـن تنسـيق الجسـم وضبطـه ــ أي تواقـت حركاتـه و اتزانهـا وسلاستها . و يكفي لفهم ذلك أن نتصور حركات الراقص المنسـابة بكـل براعـة ، أو سـهولة الإحكام عند لاعب محترف لكرة المضرب ، أو التحكم السريع الخاطف عند سائق متسابق، أو الحركات الواثقة ليد رسام أو موسيقي. أو لنتخيل أيضا قفزات الغزال الرشيقة و انسلال القط. فمن دون المخيخ لن تكون هذه الدقة ممكنة، بل ستصبح جميع الحركات مرتبكة خرقاء. و هـذا ما يتضح حين يتعلم المرء مهارة جديدة ، و لتكن مهارة السير أو قيادة السيارة. فعليـه في البـدء أن يفكر في كل فعل بالتفصيل و أن يبقى دماغه مراقبا يقظاً، و لكـن حـين تكـون المهـارة قـد أصبحت متأصلة ــ و أصبحت " جزءا جديدا من طبيعته "، فعندئذ يتولى المخيخ أمور الحركـة. أضف إلى ذلك أن ثمة تجربة مألوفة، وهـي أن المـرء إذا راح **يفكـر** في أفعالـه عنـد قيامـه بمهـارة متأصلة لديه جيداً، فقد يفقد عندئذ سهولة ضبط حركاته . إذ يبدو أن التفكير في هذه الأفعـال يدفع إلى تدخل مراقبة المخ من جديد. الأمـر الـذي يـؤدي فعـلاً إلى مرونـة جديـدة في النشـاط ولكن تضيع على الرغم من ذلك سلاسة فعل المخيخ و دقتها*

هنا أيضاً كان إهمالي الكلي لأجزاء الدماغ الأخرى و في وصفي الأخير لعمل المخ مضللاً. فعلى سبيل المثال، يقوم الحصين بدور حيوي في تخزين الذكريات الطويلة الأمد (أو الدائمـة)، إذ تخزن الذكريات الحالية في مكان ما من القشرة الدماغية ــ و علـى الأرجـح في عـدة أمـاكن معاً. كما يمكن للدماغ أيضاً أن يحفظ الصور بطرق أخرى لمدة قصيرة، و يمكـن لـه أن يحتفـظ بها لعدة دقائق أو حتى لساعات (و ذلك بأن يحتفظ بها في ذاكرته). و لكن لا بد لنـا، لكـي نستيطع تذكر هذه الصور بعد أن تكون قد غابت عن الانتباه ، من أن نخزنها بطريقـة دائمـة ،

---

* والغريب في الأمر أن سلوك المخ المتصالب لا ينطبق على المخيخ ، أي أن نصف المخيخ الأيمن يضبـط الجـانب الأيمـن من الجسم، والنصف الأيسر منه يضبط الجانب الأيسر من الجسم.

وهنا يكون دور الحصين أساسياً. (لذلك يسبب أي تلف في الحصين ظرفاً مرعباً لا يمكن أن يتذكر المرء معه أي شيء بمجرد غيابه عن ساحة وعيه). أما الجسم الثفني (الجاسىء) فهو المنطقة التي يتصل بواسطتها نصف الدماغ الأيمن بنصفه الأيسر . (و سنشاهد فيما بعد بعض النتائج المذهلة المترتبة على قطع ***الجسم الثفني***). وأما تحت المهاد فهو موضع الانفعال ــ السرور والغضب و الخوف و اليأس و الجوع ــ وهو الذي يتوسط بين المظهرين العقلي والجسدي للانفعال . إذ ثمة جريان دائم للإشارات بين ***تحت المهاد*** و مختلف أقسام المخ. و يقوم المهاد بعمل مركز تسيير مهم و محطة ارتباط، كما ينقل العديد من المدخلات العصبية من العالم الخارجي إلى قشرة المخ . و أما ***التكوين الشبكي*** فهو المسؤول في الحالة العامة عما يثار في الدماغ كله، أو في أجزاء منه ، من اليقظة أو الوعي . و هناك العديد جدا من المسالك العصبية التي تربط بين هذه المساحات الحيوية المهمة و كثير غيرها.

والآن، و بعد هذا الوصف الذي اقتصر على إعطاء عينة من بعض أهم أقسام الدماغ، علي أن أختم هذه الفقرة بإعطاء بعض الإضافات عن تنظيم الدماغ بمجموعة. فلقد صنفت أقسامه المختلفة في ثلاث مناطق تدعى بحسب ترتيبها بدءا من العمود الفقري : الدماغ الخلفي hindbrain or rhombencephalon ، و الدماغ الأوسط midbrain or mesencephalon والدماغ الأمامي forebrain or prosencephalon وهذه المناطق الثلاث توجد بترتيبها هذا في بدايات نمو الجنين على شكل ثلاثة انتفاخات عند نهاية العمود الفقري. ثم ينبت على كل جانب من الانتفاخ النهائي، أي من الدماغ الأمامي النامي، برعمان منتفخان، سيصبح كل منهما نصف كرة المخ . و يتضمن الدماغ الأمامي المكتمل النمو، الكثير من أقسام الدماغ الهامة ــ إذ يضم علاوة على المخ، الجسم الثفني و المهاد و تحت المهاد و الحصين و أقساماً أخرى كثيرة أيضاً. أما المخيخ فهو جزء من الدماغ الخلفي .و يقع جزء من التكوين الشبكي في الدماغ الأوسط و جزء آخر في الدماغ الخلفي. وقد كان الدماغ الأمامي هو الأحدث في سلم التطور و الدماغ الخلفي هو الأقدم .

وأخيرا آمل أن تقدم هذه اللمحة الموجزة للقارىء فكرة بسيطة عن ماذا يشبه دماغ الإنسان وعما يفعله بوجه عام . هذا على الرغم من عدم كفايتها من جوانب عديدة. فأنا لم أكد ألامس حتى الآن القضية الرئيسية ، التي هي مسألة ***الشعور***، و هي ما سأتعرض له فيما يلي.

أين موضع الشعور ؟

لقد طُرحت وجهات نظر عديدة مختلفة بشأن العلاقة بين حالة الدماغ و ظاهرة الشعور. ومما يلفت النظر ضآلة الاتفاق في الرأي حول ظاهرة لها مثل هذه الأهمية البيّنة، إلا أن الشيء الأكيد هو عدم مشاركة جميع أقسام الدماغ بدرجة واحدة في تجلي الشعور. فالمخيخ على

سبيل المثال يبدو، كما ألمحنا ، أقرب من المخ لأن يكون " آلياً. "أي أن الأفعال الخاضعة لتحكم المخيخ تتم، كما يبدو، " تلقائياً " من دون أن يكون المرء قد "فكر فيها ". ففي حين أنه يمكن للمرء أن يقرر المشي عن وعي من مكان إلى آخر ، نجد في أغلب الأحيان أنه لا يعي خطة حركات العضلات الجاهزة التي سيحتاجها لحركته المنضبطة . و يمكن أن يقال الشيء نفسه عن الأفعال المنعكسة اللاشعورية . كانتزاع يدنا من موقد حار ، فهذه الحركة يمكن أن تكون واسطتها القسم العلوي من الحبل الشوكي spinal column و ليس الدماغ إطلاقا. و نستنتج من ذلك أنه يحق للمرء أن يكون أكثر ميلا لأن يستدل على الأقل بأن ظاهرة الشعور لها على الأرجح صلة بعمل المخ أكثر من صلتها بالمخيخ أو بالحبل الشوكي.

هذا و من جهة أخرى ليس من الواضح إطلاقا وجود ضرورة لبقاء نشاط المخ يتدخل ***باستمرار*** في وعينا ، ففي فعل المشي العادي مثلاً حين لا يكون المرء ، كما سبق وصفه ، واعياً لتفاصيل نشاط عضلاته و أطرافه ـ لأن مراقبة هذا النشاط تتم على نطاق واسع في المخيخ (يساعده في ذلك أقسام أخرى من الدماغ و الحبل الشوكي) ـ عندئذ لابد كما يبدو من أن تكون المناطق المحركة الأولية أيضا من المخ مشتركة في هذا العمل. و هذا ما ينطبق أيضاً ولابد، على مناطق الإحساس الأولية. إذ يمكن للمرء ألا يكون واعيا في كل خطوة للضغوط المتغيرة على باطن قدميه عند المشي، و لكن لابد من أن تبقى المناطق ذات الصلة من قشرة الإحساس الجسدي نشيطة على الدوام .

ولقد أثبت جراح الأعصاب الكندي اللامع و.بنفليد Wilder Penfield بالفعل أن الوعي عندنا لا يرتبط ارتباطاً بسيطاً بنشاط الدماغ (ويعود لهذا الجراح ، في الأربعينيات و الخمسينيات، الفضل في وصف الكثير من تفاصيل خارطة المناطق المحركة و الحسية في دماغ الإنسان). وقد عرض، اعتماداً على تجاربه التي أنجز فيها عمليات عديدة في الدماغ على أشخاص واعين، فكرة تقول بأن هناك منطقة، سماها أعلى ***جذع الدماغ*** upper brain stem، يتألف القسم الأعظم منها من المهاد و من الدماغ الأوسط (أنظر بنفيلد Penfield وجاسبرJaspar 1947) ـ على رغم أن الشيء الأساسي الذي كان يقصده هو التكوين الشبكي ـ هي التي يجب أن تعد " موضع الشعور " . فهي تبقى على اتصال مع المخ ، لذلك كانت حجة بنفيلد أن " الوعي الشاعر"، أو "الفعل المرغوب عن وعي " يظهر حين تكون هذه المنطقة من جذع الدماغ على اتصال مباشر مع المنطقة المختصة من القشرة الدماغية، التي ترتبط بأي نوع من الأحاسيس أو الأفكار أو الذكريات أو الأفعال التي تكون في ذلك الحين نفسه مدركة أيضا في ساحة الشعور. و قد أشار بنفيلد إلى أنه في الوقت الذي يستطيع أن يحرض مثلا منطقة القشرة المحركة عند شخص ما، وبسبب تحريك ذراعه اليمنى (و يتحرك الساعد الأيمن فعلا) فإن هذه الحركة لا تسبب عند الشخص رغبة في تحريك ذراعه اليمنى. (بل بإمكان الشخص عندئذ أن يمد ذراعه اليسرى لإيقاف حركة ذراعه اليمنى ـ كما هو الحال في

الصورة السينمائية المشهورة التي رسمها سلرز Peter Sellers للدكتور" استرنج لَف " Strangelove (أي حب غريب). وهكذا اقترح بنفيلد أنه يمكن أن تكون الرغبة في الحركة مرتبطة بالمهاد أكثر مما هي مرتبطة بالقشرة الدماغية. وكانت وجهة نظره أن الشعور، هو تجل لنشاط أعلى جذع الدماغ ، و لكن لما كان ينبغي، إضافة إلى ذلك، وجود شيء ما حوله، يشعر به، لذلك ليس جذع الدماغ وحده هو المساهم في العملية، وإنما تشارك فيها أيضاً منطقة من القشرة الدماغية تكون عندئذ على اتصال مع أعلى جذع الدماغ و يمثل نشاطها موضوع الشعور (انطباع حسي مثلاً أو ذكرى) أو هدفه (أي فعل مرغوب).

ولقد حاول أيضاً علماء آخرون في فيزيولوجية الأعصاب أن يثبتوا أن التكوين الشبكي، بوجه خاص ، يمكن أن يعد موضع الشعور ، فيما لو كان مثل هذا الموضع موجودا أصلاً. ومهما يكن من أمر فإن التكوين الشبكي مسؤول عن الحالة العامة ليقظة الدماغ (موروتزي وماغون Moruzzi & Magoun 1949) ويؤدي تخريبه إلى حالة من اللاوعي. كما يظل التكوين الشبكي نشيطاً ما دام الدماغ في حالة من اليقظة الواعية، و إلا فإنه لن يكون نشيطاً. وهكذا تبين إذن أن هناك ارتباطاً مؤكداً بين نشاط التكوين الشبكي و تلك الحالة التي يقال فيها عادة عن الشخص إنه " واع ". ولكن حالة الحلم عقدت الأمور، لأن الشخص عندئذ يكون واعياً، بمعنى أنه واع للحلم ذاته، في حين أن أقساما من التكوين الشبكي التي تكون عادة نشيطة، تبدو عندئذ غير نشيطة. ثم إن ثمة مشكلة تقلق الباحثين بشأن إضفاء مثل هذه الصفة المشرِّفة على التكوين الشبكي و هي أنه قسم قديم جداً من الدماغ في مدارج التطور. لذلك إذا كان كل ما يحتاجه الفرد ليكون واعيا هو تكوين شبكي نشيط فعندئذ تكون الضفادع والسحالي، و حتى سمكة الكود ، كلها واعية .

ولكني، شخصياً، لا أرى أن هذه الحجة الأخيرة قوية جداً. إذ ما الدليل الذي نملكه على أن السحالي و سمكة الكود *ليس* لديها شكل من أشكال الوعي المنخفض المستوى ؟ ثم بأي حق نعلن، كما يقول بعضهم، بأن الكائنات البشرية هم القاطنون الوحيدون في كوكبنا الذين يتمتعون بالقدرة على أن يكونوا واعين ؟ و هل نحن الوحيدون بين مخلوقات الأرض الذين يمكن أن يطلق عليهم صفة "كائن" ؟ إني أشك في ذلك. إذ على الرغم من أن الضفادع والسحالي و بخاصة سمكة الكود لا توحي إلي بقناعة كبيرة بأن هناك فعلا " كائنا " يحملق في مثلما أحملق فيه، إلا أن شعوراً قوياً ينتابني فعلاً حين أنظر إلى كلب أو قط. إذ أشعر عندئذ أن معي "حضوراً واعياً " أو، بوجه خاص ، عندما ينظر إلي قرد أو سعلاة في حديقة الحيوانات . لكنني حتماً، لا أتوقع أن يكون لدى هذه الحيوانات شعور مثل الذي لدي، ولا حتى بأن تكون هناك تعقيدات كثيرة فيما تشعر. كما أني لا أنادي بأنها " واعية لذواتها " بكل ما في هذا المعنى من قوة (وعلى رغم ذلك، لدي إحساس واضح بأن عنصراً من عناصر " وعي

الذات " يمكن أن يكون حاضراً* لديها) بل إن كل ما أنادي به هو أنها تشعر أحياناً فحسب، وأني مستعد شخصياً للتسليم، كما فعلت في حال الحلم، بأن شكلاً من أشكال الوعي حاضر لديها، ولكن على الأغلب أنه مجرد وعي متدني المستوى .فإذا كانت بعض أقسام التكوين الشبكي وحدها مسؤولة بطريقة ما عن الوعي، فعندئذ لابد أن تكون نشيطة و إن في مستو متدن، في أثناء الحلم .

وثمة وجهة نظر أخرى(أوكيف 1985 O' Keefe) تحاول أن تقول بأن عمل الحصين هو الذي يؤهله أكثر لأن يكون صاحب العلاقة بحالة الوعي. لأن الحصين،كما سبق أن ذكرت،له دور حاسم في حفظ الذكريات الطويلة الأمد. فيمكن إذن الأخذ بحجة أن حفظ الذكريات الدائمة مرتبط بالشعور، فإذا صح هذا فلابد عندئذ أن يكون الحصين هو الذي يقوم بدور أساسي في ظاهرة " الوعي الشاعر".

وهناك آخرون يصرون على أن قشرة المخ نفسها هي المسؤولة عن الوعي، معتمدين على أن المخ هو مفخرة الإنسان (على الرغم من أن أمخاخ الدلافين كبيرة كمخ الإنسان)، و على أن أوجه النشاط العقلي ، المرتبطة أوثق ارتباط بالذكاء ، ينفذها المخ ، لذلك كان من المؤكد أن روح الإنسان تقيم هنا . ولا شك أن هذا ما يمكن أن نفترض سلفا أن أنصار الذكاء الاصطناعي القوي سيتوصلون إليه ، على سبيل المثال . لأن "الوعي " إذا كان مجرد سمة من سمات ***التعقيد*** في خوارزمية ما ــ أو ربما سمة مرافقة " لعمق هذا التعقيد ، أو " لمستوىً معين من الرهافة " ـ فعندئذ لابد، وفقاً لوجهة نظر الذكاء الاصطناعي القوي ، أن تكون الخوارزميات المعقدة التي تنفذها قشرة المخ أقوى حجة للرأي القائل إن هذه المنطقة بالذات هي القادرة على إظهار الشعور .

ويبدو أن الكثير من الفلاسفة وعلماء النفس يأخذون بوجهة النظر القائلة إن شعور الإنسان مرتبط ارتباطاً قوياً جداً ***بلغته***. فنحن لا نستطيع أن نتوصل تبعاً لذلك، إلى رهافة التفكير التي هي أقوى السمات المميزة لإنسانيتنا (و المعبرة عن نفوسنا ذاتها) إلا بفضل قدراتنا اللغوية. و اللغة ــ وفقاً لوجهة النظر هذه ــ هي التي تميزنا عن الحيوانات الأخرى ، كما تعطينا ذريعة لأن نجرد هذه الحيوانات من حريتها و نذبحها حين نشعر بأن حاجتنا تقتضي ذلك. واللغة هي التي تتيح لنا أن نتفلسف وأن نصف كيف نشعر. و هكذا نستطيع أن نقنع الآخرين أننا نملك وعياً بالعالم الخارجي و أننا أيضاً واعين لذواتنا. فلغتنا من وجهة النظر هذه تعد العنصر الذي ينبىء عن امتلاكنا للوعي .

---

* ثمة دليل مقنع نوعاً ما بأن الشمبانزي، على الأقل، قادر على وعي ذاته. وهذا ما يبدو أنه أثبت في تجارب أتيح فيها للشمبانزي أن يلعب مع المرايا (انظر أوكلي 1985 Oakly الفصلان الرابع والخامس).

والآن، علينا أن نتذكر أن مراكز اللغة (عند الأكثرية الساحقة من الناس) تقع في الجانب ***الأيسر*** من الدماغ (مساحات بروكا و فيرنايك) لذلك قد يبدو أن وجهة النظر التي عرضناها منذ قليل تقتضي أن يكون الشعور مرتبطاً بالقشرة الدماغية اليسرى فحسب و ليس باليمنى ! ويبدو أن هذه الفكرة هي بالفعل فكرة عدد من فيزيولوجيي الأعصاب (ولا سيما إكلز J. Eccles 1973) على رغم أنها تبدو بالنسبة لي أنا البعيد عن ميدانهم، ولأسباب سأشرحها، وجهة نظر نابية .

تجارب الدماغ المشطور

سأذكر في هذا الشأن مجموعة من الملاحظات اللافتة للنظر المتعلقة بأشخاص (وحيوانات) أجريت لهم عملية شطر الجسم الثفني شطرا كاملاً، فلم يعد ممكنا اتصال أحد نصفي كرة القشرة المخية عندهم بالآخر. وقد أجريت هذه العملية عند الأشخاص (2) بوصفها جراحة علاجية ، إذ وجد أنها فعالة بالنسبة لنوع قاس خاص من الصرع كان يعاني منه هؤلاء. وكان ر. سبري Roger Sperry و مرافقوه يخضعونهم ، بعد مرور بعض الوقت على إجراء العملية، لاختبارات نفسية عديدة . فكانوا يضعونهم في أوضاع تجعل مجالي الرؤية الأيسر والأيمن معرضين لحرضين مفصولين كلياً. فكان نصف الكرة الأيسر يتلقى المعلومات البصرية من الشيء المعروض في الجانب الأيمن فحسب. و كذلك يتلقى نصف الكرة الأيمن المعلومات من الجانب الأيسر . فإذا لمعت صورة قلم على اليمين، وصورة فنجان على اليسار، فإن الشخص سيقول عندئذ " هذا قلم " لأن القلم و ليس الفنجان هو الذي أدركه جانب الدماغ القادر ظاهرا على الكلام .و مع ذلك، كانت اليد اليسرى قادرة على اختيار صحن بدلاً من قطعة الورق، لأنه الشيء المناسب ليوضع تحت الفنجان. علما أن اليد اليسرى تقع تحت إشراف نصف الكرة الأيمن، الذي على رغم أنه غير قادر على الكلام ، ينجز أفعالا معقدة جدا و متميزة بطابعها الآدمي. و قد اقترح بعضهم بالفعل أن ***التفكير الهندسي*** (وبخاصة في الأبعاد الثلاثة)، وكذلك الموسيقى، من الجائز أنها تنفذ بصورتها الأساسية داخل ***نصف الكرة الأيمن*** لكي تكافىء المؤهلات التحليلية و الكلامية في الأيسر. و يمكن للدماغ الأيمن أن يفهم الأسماء العامة أو الجمل الأولية ويقوم بعمل حسابي بسيط جداً.

وأكثر ما كان مدهشا عند هؤلاء الأشخاص المشطوري الدماغ هو أن الجانبين كان يبدو أنهما يتصرفان كأنهما فردان مستقلان عملياً. و يمكن للمجرب أن يتصل بكل منهما بمعزل عن الآخر – على الرغم من أن الاتصال مع نصف الكرة الأيمن أصعب ويتم على مستو بدائي أدنى من الاتصال مع الجانب الأيسر ، وهذا نتيجة لافتقار الجانب الأيمن للمؤهل الكلامي. و يمكن لأحد نصفي مخ المريض أن يتصل بالنصف الآخر بطرق بسيطة، كأن يراقب مثلاً حركة الذراع الخاضعة لإشراف النصف الآخر، أو ربما بسماع الصوت المميز لشيء (قرقعة

صحن مثلاً) ولكن حتى هذا الاتصال بين الجانبين، برغم بدائيته، يمكن أن يحذف ضمن شروط مخبرية تتم مراقبتها بعناية. إلا أن مشاعر عاطفية مبهمة يمكن أن تستمر في مرورها من جانب إلى آخر، على كل حال، والسبب كما يفترض هو أن البنى التي لم تشطر، كتحت المهاد مثلاً، تظل على اتصال مع الجانبين .

وهنا تراودنا نفسنا بإثارة المسألة التالية : ترى ألدينا شخصان واعيان يسكنان معا في جسد واحد ؟ لقد أصبح هذا السؤال مدار خلاف كبير. فمنهم من يود التمسك بأن الجواب يجب أن يكون حتماً " نعم " ، في حين أن آخرين يعلنون أنه ما من جانب يمكن أن يعد وحده فرداً كاملاً. و يحاول بعضهم أن يثبت أيضاً أن الوجود المشترك للمشاعر العاطفية في الجانبين هو دليل على أن هناك على رغم انفصالهما، فرد واحد فحسب هو المسؤول. وهناك علاوة على ذلك وجهة نظر تقول إن نصف الكرة ***الأيسر*** وحده يمثل الفرد الواعي، و أن النصف الأيمن ليس سوى الجانب الآلي . و يبدو أن من يدعم هذا الرأي هم الذين يتمسكون بأن اللغة هي أحد مقومات الشعور الأساسية . والحقيقة أن النصف الأيسر وحده هو الذي يمكنه أن يرد عن قناعة بـ " نعم " على السؤال : " هل أنت واع ؟" أما النصف الأيمن، فشأنه شأن كلب أو قط أو شمبانزي ، فربما كان محروما ، حتى من فك رموز الكلمات المكونة للسؤال، كما قد يكون غير قادر على التلفظ بالجواب بالصورة المناسبة .

على أن المسألة لا يمكن أن تنتهي بهذه السهولة. فلقد درس دونالد ولسون و معاونوه (Wilson et al 1977 , Cazzaniga , Le doux , Wilson 1977) في تجربة أقرب عهدا وذات أهمية كبيرة، حالة شخص مشطور الدماغ عرف بالحرفين ب.س. فبعد عملية الشطر، لم يستطع أن يتحدث إلا نصف الكرة الأيسر. و لكن نصفي الكرتين ***معاً*** كانا يفهمان الكلام . ثم فيما بعد، تعلم الكلام أيضاً نصف كرة دماغه الأيمن! فنصفا الكرتين إذن كانا بالتأكيد واعيين . بل لقد ظهر علاوة على ذلك أن كلاً منهما ***واع بمفرده***، إذ كانت لهما رغبات ومطالب مختلفة . فكان النصف الأيسر مثلا يقول إن أمنيته هي أن يصبح رسام تصاميم، و الأيمن سائق سباق .

وأنا شخصياً لا أستطيع، بكل بساطة أن أصدق الدعوى الشائعة أن لغة الإنسان العادية ضرورية للتفكير أو للشعور. (وسأعطي في الفصل التالي بعض حججي في ذلك). ولذلك أقف إلى جانب أولئك الذين يعتقدون، بوجه عام ، أنه يمكن لنصفي دماغ الشخص المشطور الدماغ أن يكونا واعيين. إذ يوحي مثال ب.س. بقوة بأن كلا النصفين يمكن أن يكونا ، على الأقل في هذه الحالة الخاصة ، واعيين. و الفرق الحقيقي الوحيد بين ب.س. والآخرين، في هذا المضمار، هو أن شعوره الأيمن كان يستطيع فعلا أن يقنع الآخرين بوجوده !

فإذا سلمنا بأن لدى ب.س. فعلاً عقلين مستقلين، نكون عندئذ أمام وضع لافت للنظر. لأننا نعلم مسبقاً أن أي شخص يخضع لعملية شطر الدماغ لا يكون له قبل العملية سوى شعور

واحد، و لكنه بعدها يصبح لديه شعوران! أي أن الشعور الأصلي الوحيد تفرع بطريقة ما إلى شعورين . و هنا قد نتذكر الرحالة الافتراضي في الفصل الأول ص 51) الذي غامر بنفسه في آلة النقل الضوئي ، ثم استيقظ (و هو غافل) ليجد أن ذاته التي ادعى بأنها" فعلية "، قد وصلت إلى كوكب الزهرة . وهنا يبدو أن ***تفرع شعور*** هذا الرحالة يؤدي إلى مفارقة. لأننا نستطيع أن نتساءل " أي طريق اتبع مجرى شعوره " **فعلاً** "؟ . و لو كنت أنت الرحالة، فعندئذ أي الشعورين هو الذي انتهى أمره لأن يكون هو " أنت " ؟ إن آلة النقل الضوئي هي من الخيال العلمي فيمكن صرف النظر عنها، و لكن يبدو أن لدينا في حالة ب.س. شيئاً مماثلاً في الظاهر، ولكنه شيء ***حدث فعلاً*** ! فأي الشعورين عند ب.س. هو ب.س. نفسه قبل العملية ؟ لا شك أن كثيرا من الفلاسفة سيصرفون النظر عن هذا السؤال لكونه عديم المعنى ، إذ يبدو أنه ما من طريقة عملية تحسم هذه المسألة . فكل نصف كرة كان قد شارك في ذكريات وجود واع قبل العملية ، و كل منهما سيدعي حتما أنه هذا الشخص . و هذا ما قد يكون لافتا للنظر ، و لكنه في حد ذاته ليس مفارقة. و على رغم ذلك هناك إلى حد ما معضلة معينة ما زالت متعلقة بالقضية.

إن هذه المعضلة ستتفاقم أكثر فيما بعد لو ضم الشعوران أحدهما إلى الآخر من جديد بطريقة ما. حقاً أنه لا بد أن تبدو إعادة وصل أعصاب الجسم الثفني واحداً فواحداً ، أمراً مستحيلاً بحسب التقنيات الراهنة. ولكن كان يمكن النظر في شيء ألطف من شطر فعلي للألياف العصبية في المرحلة الأولى. فلربما أمكن تجميد هذه الأعصاب مؤقتاً أو شلها بعلاج ما . وأنا لست على علم بأي تجربة من هذا القبيل كانت قد نفذت **فعلاً**، و لكني أفترض أنه كان من الممكن تقنياً القيام بها قبل زمن طويل. فمن المفروض ـ بعد أن يعاد للجسم الثفني نشاطه ــ أن يصبح عند الشخص ***شعور واحد***. والآن تخيل أن هذا الشعور هو أنت ! فكيف ستشعر أنك كنت في زمن مضى شخصين منفصلين لهما ***نفسان مختلفتان*** ؟

كف البصر

يبدو أن تجارب مشطوري الدماغ تشير ، على الأقل ، إلى أنه ليس لزاما أن يكون هناك موضع واحد للشعور . مع أن هناك تجارب أخرى يبدو أنها توحي بأن بعض أقسام القشرة المخية أكثر ارتباطاً بالشعور من غيرها، وكانت إحداها تتعلق بظاهرة العمى، لأن الأذى في إحدى مناطق القشرة البصرية يمكن أن يؤدي إلى العمى في حقل الرؤية الموافقة له، وعندئذ لا يمكن إدراك أي جسم موجود في هذا الحقل. فالعمى يحدث بالنسبة لتلك المنطقة من القشرة البصرية .

إلا أن بعض المكتشفات الغريبة (أنظر فايسكرانتس Weiskrantz 1987) تشير إلى أن الأمور ليست بهذه البساطة، فقد أدت إزالة قسم من القشرة البصرية عند أحد المرضى الذي

أشير إليه بالحرفين د.ب. إلى عدم القدرة على رؤية أي شيء واقـع في منطقـة معينـة مـن حقـل الرؤية. و على رغم ذلك ، إذا وضع شيء في هذه المنطقة وطلب إلى المريـض أن ***يحزر*** مـا هـذا الشيء (وكان عادة علامة صليب مثلاً أو دائرة أو قطعة مستقيمة مائلة بزاوية مـا) فإنـه كـان يجد عنده القدرة على فعل ذلك بدقة تقرب من مئة بالمئة، وكانت دقة تخميناته تلك تدهشـــه هو نفسه، مع أنه ظل مصراً على عدم قدرته على إدراك أي شيء في هذه المنطقة مهما كان*.

والحقيقة أن الصور التي تسـتقبلها الشبكية تعالج أيضـا في منـاطق أخـرى مـن الدمـاغ غـير القشرة البصرية. فإحداها، و هي من أكثرها غموضاً، تقع في أسفل الفـص الصدغـي، إذ يبـدو أن د.ب. كان يبني تخميناته على معلومات تتلقاها هذه المنطقة . و لكن تنشيط هـذه المنـاطق، لم يكن يؤدي إلى إدراك أي شيء مباشرة عن وعي، إلا أن وجود المقومات مؤكد، و لا تظهـر إلا في تخمينات د.ب. الصحيحة . و الدليل على ذلك أن د.ب. أصبـح قـادرا بعـد شـيء مـن التدريب على تحصيل قدر من الوعي الفعلي المحدود فيما يتعلق بهذه المناطق .

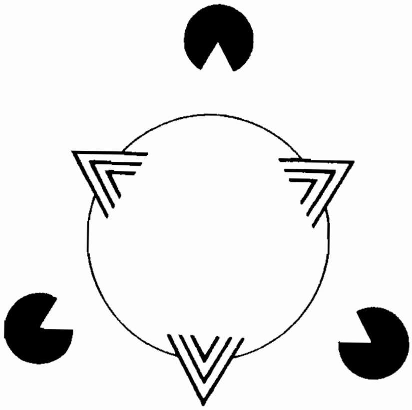
وهذا كله يثبت فيما يبدو أن بعـض منـاطق القشـرة الدماغيـة (كالقشـرة البصريـة مثـلا) يرتبط أكثر من غيره من المناطق بالإدراك الواعي، و لكن يبـدو أنـه يمكـن لبعـض هـذه المنـاطق الأخرى أن تهيىء لصاحبها بعد التدريب فرصة الوعي المباشر.

معالجة المعلومات في القشرة البصرية

لقد وضعت نماذج شتى تفسر كيف تعالج ***القشرة البصرية*** المعلومات الـتي تتلقاهـا. لذلـك كان هذا القسم مفهوماً من هذه الناحية أحسن من كل أقسام الدمـاغ الأخـرى (3). والحقيقـة أن المعلومات البصريـــة تجـرى لها معالجة بسيطة في بـادىء الأمـر في الشـبكية نفسـها قبـل أن تصل إلى القشرة البصرية . (إذ إن الشبكية نفسها تعد جـزءاً مـن الدمـاغ !). و كـانت أولى التجارب التي أمحت إلى كيفية تنفيذ الأعمال في القشرة البصرية هي تلك التي أدت إلى منـح د. هبل David Hubel و ت. فيزل Torsten Wiesel جائزة نوبل عام 1981 . إذ استطاعا أن يثبتـا في تجاربهما أن بعض خلايا القشرة البصرية لقـطّ كـانت حساسـة لخطـوط موجـودة في حقـل الرؤية، ***تميل بزاوية خاصة***. و أن هناك خلايا مجاورة لها حساسة لخطوط تميل بزاويـة مغـايرة. و لكن ليس مهماً أبداً ما هو هذا الشيء الذي له هذه الزاويـة، فقـد يكـون خطـاً يشـير إلى حـد الانتقال من الظلام إلى النور أو كذلك من النور إلى الظلام، أو مجـرد خـط مظلـم على خلفيـة مضاءة . فالسمة الوحيدة التي ميزتها الخلايا الخاصة التي فحصت هـي " زاويـة الميـل "، ولكـن

* ثمة شيء هام يضاف إلى العمى ، هو ظرف يعرف بـ " إنكار العمى " و فيه يصر الشـخص المصـاب، في واقـع الأمـر بالعمى الكلي، على أنه قادر على رؤية كل شيء بوضوح تام ، باديا عليه أنه شاعر بصريا بالأشياء الـتي يسـتدل (أو يحزر) أنها تحيط به (أنظر Churchland 1984 ص 143).

هناك أيضاً خلايا أخرى حساسة لألوان معينة، أو للفرق بين ما تستقبله كل عين بمفردها، و هو ما يساعد على التوصل إلى إدراك العمق. وكلما ابتعدنا عن مناطق الاستقبال الأولى في الدماغ، نجد أن هناك خلايا حساسة لجوانب أكثر فأكثر رهافة في إدراكنا البصري، فنحن ندرك على سبيل المثال صورة مثلث أبيض كامل عندما ننظر إلى الرسم في الشكل 9 — 7 ، على الرغم من أن الخطوط التي تؤلف المثلث نفسه لا وجود لها في الحقيقة على الشكل، بل نستدل عليها . إذ إن هناك خلايا في القشرة البصرية (و في ما يدعى بالتحديد القشرة البصرية الثانوية) وجد أنها هي التي تسجل أوضاع هذه الخطوط التي استدل عليها .



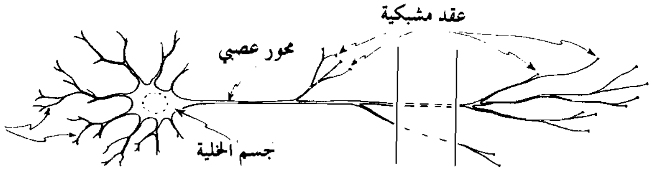
الشكل9 ــ 7 : هل يمكنك رؤية مثلث أبيض موضوع على مثلث آخر ثبت بواسطة حلقات؟ إن أضلاع المثلث الأبيض غير مرسومة إطلاقاً، و على رغم ذلك توجد خلايا في الدماغ تستجيب لهذه الخطوط التي ندركها مع أنها غير مرئية.

ولقد ظهرت في أدبيات مطلع السبعينيات ادعاءات (4) عن اكتشاف خلية في القشرة البصرية عند أحد القرود، تستجيب فحسب عند تسجيل صورة وجه معين . فصيغت بناء على هذا " فرضية خلية الجدة " التي تقول بأن هناك خلايا معينة في الدماغ لا يمكن لها أن تستجيب إلا عندما تدخل جدة الشخص الغرفة ! و هناك بالفعل اكتشافات حديثة تشير إلى أن بعض الخلايا لا تستجيب إلا لكلمات معينة . فقد تكون هذه الظواهر سائرة في الطريق نحو تحقق فرضية خلية الجدة بصورة ما ؟

ولاحاجة بناء إلى القول إن هناك الكثير جداً مما يجب تعلمه عن المعالجة المفصلة التي ينفذها الدماغ. فنحن لا نعرف إلى الآن سوى القليل جدا عن الطريقة التي تنفذ بها مراكز الدماغ الأعلى واجباتها. لذلك دعونا نترك الآن هذه المسألة جانباً ونحول أنظارنا إلى الخلايا الفعلية التي تمكن الدماغ من القيام بهذه الإنجازات الرائعة .

كيف تعمل الإشـــارات العصبيــة ؟

إن ما يقوم به الدمــاغ مـن إجـراءات[x] (وكذلـك النخـاع الشـوكي و الشـبكية) تنجـزه بأكمله تلك الخلايا الرائعة المتعددة الفعاليات في الجسم التي تدعـى ***العصبونـات***(5) neurons ولقد عرضت في الشكل 9 ـ 8 صورة لعصبون، فدعونا نرى كيف يبدو مظهره . إننـا نلاحـظ وجود انتفاخ مركزي لعله يشبه النجم بعض الشيء، ولكنه يتخذ على الأغلب بدلا مـن ذلـك شكل الفجلة، و يدعى **جسم** العصبون soma وهو يحوي نواة الخليـة. وتمتـد منـه مـن طـرف واحد استطالة تتألف من ليف عصبي طويل ــ هو بـالفعل طويـل جـداً في بعـض الأحيـان، مـع ملاحظة أننا لم نشر في الشكل إلا لخلية مجهرية واحدة (و يتجاوز طوله غالبا عند الإنسان عدة سنتيمترات) ــ يدعى ***المحور*** العصبي axon. ويقوم المحور مقام السلك الـذي تنقـل عـن طريقـه الإشارة الخارجة من الخلية . و قد ينبت من المحور فروع كثيرة صغيرة، كما يتفرع المحـور عـدة مرات. ونجد عند نهاية كل واحد من هذه الألياف العصبية الناشئة، ***عقدة مشـبكية*** synaptic knob صغيرة. كما يوجد عند الطـرف الآخـر مـن جسـم الخليـة، تفرعـات تخـرج منهـا علـى الأغلـب في كافة الاتجاهات ، وتشبه أغصـان الشـجرة، وتسـمى ***التغصنـات*** dendrites وعـن طريقها ترد إلى جسم الخلية البيانات الداخلة. (ويوجد من حين لآخر عقد مشبكية أيضـاً علـى التغصنـات توفـر مـا يدعـى التشـابك التغصـني dendrodendritic synapses بـين الفـروع (الأغصان) ولكني سأتجاهل هذا الواقع في دراستي، لأن التعقيد الذي فيها ليس أساسـياً بالنسـبة لنا) .

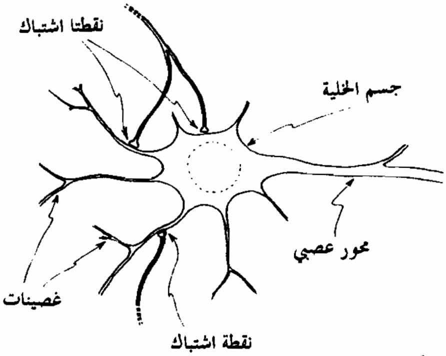


الشكل 9 ـ 8 : يمثل هذا الشكل عصبونا (و هو غالبا أطول بكثير جداً نسبياً مما هو مشار إليه) وتتباين أنواع العصبونات المختلفـة كثيـراً في مظهرها التفصيلي

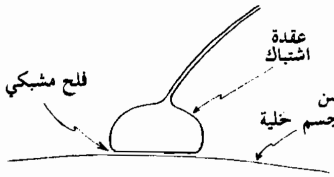
وللخلية بأكملها، لكونها وحـدة قائمـة بذاتهـا، غشـاء خلـوي يحيـط بجسـمها و بمحورهـا وبعقد تشابكها و تغصناتها وكل شيء فيها. كما لابد للإشارات من أن " تجتـاز هـذا الحـاجز الموجود بين الخلايا " لكي تمر من عصبون إلى آخر. وهذا ما يتم عند الوصلات المعروفـة باسـم **نقط الاشتباك** synapses، حيث تتصل عقدة الاشتباك من عصبون عند نقطة مـا مـن عصبـون

[x] معالجة معلومات، الوصول إلى قرارات، أوامر بالحركة...إلخ.

آخر، سواء عند جسم هـذا العصبـون نفسـه أو عنـد أحـد تغصناتـه (أنظـر الشـكل 9 ــ 9). وهناك في الحقيقة فجوة ضيقة جداً بـين عقـدة المشـبك و الجسـم أو التفـرع الـذي ترتبـط بـه، وتدعى الفلح (أو الفراغ) المشبكي (synaptic cleft أنظر شـكل 9 ـــ 10). فعلـى الإشـارة التي تنتقل من عصبون إلى تاليه أن تنتشر عبر هذه الفجوة .



الشكل 9 ــ 9 : نقاط الاشتباك ، الوصلات بين عصبون و تاليه

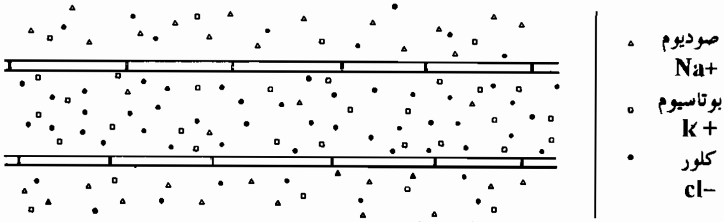


الشكل 9 ــ 10 : تفصيل تقريبي لعقدة مشبكية. لاحظ وجود فلح (فراغ) ضيق تجري عبره المواد الكيماوية الناقلة في الأعصاب

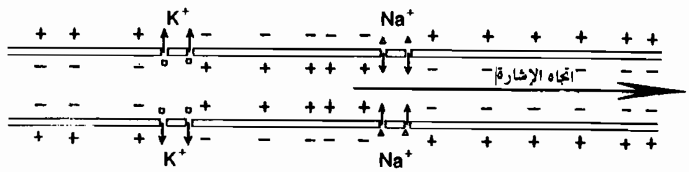
ولكن أي شكل هذا من أشكال الإشارات ينتشر على طول الألياف العصبية و عـبر فلـوح الاشتباك ؟ ثم ماالذي يدفع العصبون التالي إلى إطلاق إشارة ؟ هنا تبدو الإجراءات التي اتخذتها الطبيعة لتحقيق هذا الهدف فوق ما يتصور المرء ــ إنها رائعة بكل معنى الكلمـة ! و لربمـا فكـر أحدكم أن هذه الإشارات ليست أكثر من إشـارة تشـبه التيـارات الكهربائيـة الـتي تجـري عـبر الأسلاك. في الواقع أن الأمور أعقد من ذلك بكثير.

يتكون الليف العصبي أساسا من قناة أسطوانية تحوي محلولا مختلطا من الملح العادي (كلور الصوديوم) وكلور البوتاسيوم ــ و بخاصـة مـن هـذا الأخـير . ففـي هـذه القنـاة توجـــد إذن أيونات صوديوم وبوتاســيوم وكلـور (الشـكل 9 ـــ 11). و هـذه الأيونـات موجـودة أيضـاً خارج القناة و لكن بنسب مختلفة، إذ يوجد في خارج القناة أيونات صوديوم أكثر من أيونـات البوتاسيوم . و حين يكون العصب في حالة استراحة ، تكون الشـحنة الكهربائيـة داخـل القنـاة سالبة تماماً (أعني أن أيونات الكلور أكثر من أيونات الصوديوم و البوتاسيوم مجتمعـة ـــ و هنـا

نذكر بأن أيونات الصوديوم و البوتاسيوم موجبة الشحنة، أما أيونات الكلور فسالبة) وتكون الشحنة الكهربائية الحاصلة خارج القناة موجبة تماماً. (أعني أن أيونات الصوديوم والبوتاسيوم أكثر من الكلور). ولما كان الغشاء الخلوي الذي يكوّن سطح الأسطوانة نَفوذا إلى حدما ، لذلك تسعى الايونات إلى الهجرة عبره لتعادل فرق الشحنة. ولاستدراك هذا الأمر و الاحتفاظ بزيادة الشحنة السالبة داخل القناة، وجدت " مضخة استقلابية " تقوم بضخ أيونات الصوديوم ببطء شديد و إعادتها إلى الخارج عبر الغشاء المحيط بالعصب. الأمر الذي يعمل جزئياً أيضاً على حفظ زيادة البوتاسيوم في الداخل على الصوديوم. وهناك أيضاً مضخة استقلابية أخرى (أضعف إلى حد ما من السابقة)، تضخ أيونات البوتاسيوم من الخارج إلى الداخل، وتساهم بذلك بزيادة البوتاسيوم في الداخل (مع أنها تعمل بعكس الحفاظ على اختلال تعادل الشحنة، أي بعكس الحفاظ على الشحنة السالبة في الداخل).



الشكل 9 ــ 11 : يمثل هذا المخطط ليفاً عصبياً. في حالة الاستراحة تكون أيونات الكلور في الداخل أكثر من أيونات الصوديوم والبوتاسيوم معاً، وتكون الشحنة النهائية سالبة. والطريقة المخالفة في الخارج تؤدي إلى شحنة موجبة. كما أن التعادل صوديوم / بوتاسيوم يختلف في الخارج عن الداخل، إذ يوجد في الداخل بوتاسيوم أكثر، و في الخارج صوديوم أكثر



الشكل 9 ــ 12 تتكون الإشارة العصبية من منطقة معكوسة الشحنة تنتقل على طول الليف العصبي . ففي بدئها تفتح بوابات الصوديوم لتتيح للصوديوم الجريان إلى الداخل . و في النهاية تفتح بوابات البوتاسيوم لتتيح جريان البوتاسيوم إلى الخارج . ثم تقوم المضخات الاستقلابية على إعادة الوضع الراهن إلى حاله.

أما ***الإشارة*** التي تنتقل على طول الليف فليست سوى منطقة ينعكس فيها الاختلال، (أي تكون الشحنة فيها موجبة في الداخل و سالبة في الخارج) وتنتقل على طول الليف (الشكل 9 ــ 12). فليتصور المرء نفسه على الليف العصبي مباشرة أمام منطقة كهذه تنعكس فيها الشحنة. فحين تقترب هذه منه، يسبب حقلها الكهربائي فتح منافذ صغيرة في الغشاء الخلوي تدعى ***بوابات الصوديوم***، الأمر الذي يتيح لأيونات الصوديوم أن تجري عبرها مرتدة من الخارج إلى الداخل

(ويتم ذلك بتراكب قوى كهربائية مع الضغوط الناشئة عن اختلاف التركيز)، أي الضغوط الأوسموزية (الحلول) . و يؤدي ذلك إلى أن تصبح الشحنة في الداخل موجبة و في الخارج سالبة . و حين يتم ذلك تكون هذه المنطقة التي انعكست فيها الشحنة، و التي هي الإشارة نفسها، قد وصلت إلى الشخص الموجود (كما تخيلنا) على الليف العصبي. الأمر الذي يؤدي إلى فتح مجموعة أخرى من المنافذ الصغيرة، (هي ***بوابات البوتاسيوم***) التي تتيح لأيونات البوتاسيوم أن تخرج عائدة من الداخل إلى الخارج . و هكذا تبدأ إعادة الزيادة في الشحنة السالبة (أيونات الكلور) إلى الداخل، وتكون الإشارة حينذاك قد مرت. وأخيراً، وبينما تبتعد الإشارة، يقوم عمل المضخات البطيئة بدفع أيونات الصوديوم ثانية، ومن غير توان، إلى الخارج وأيونات البوتاسيوم إلى الداخل، الأمر الذي يستعيد حالة الراحة للألياف العصبية لتكون مستعدة لإشارة أخرى .

لنلاحظ أن الإشارة هي مجرد منطقة ذات شحنة معكوسة، يتغير موضعها على طول الليف. وتتحرك وسيلتها الحقيقية (أي الأيونات) حركة صغيرة جداً ـ إذ إنها تتحرك فحسب إلى داخل الغشاء الخلوي و خارجه .

والطريف في أمر هذه الآلية الغريبة أنها تقوم بعملها كما يبدو خير قيام. و هي نفسها تستخدم في سائر الحيوانات الفقارية واللافقارية. ولكن الفقاريات لديها بدعة أخرى هي امتلاكها لألياف عصبية محاطة بغلاف يتألف من مادة دهنية ضاربة إلى البياض تدعى نخاعين (أو ميلين) myelin (وهذا الغلاف النخاعي، أو الغمد، هو الذي يعطي " المادة البيضاء " في الدماغ لونها). كما يهيىء هذا العزل للإشارات العصبية إمكان الانتقال بكامل قوتها (بين "محطات الارتباط ") و بسرعة كبيرة جداً ـ أكبر من 120 متراً في الثانية تقريباً.

كما تطلق الإشارة عند وصولها إلى إحدى العقد المشبكية مادة كيماوية تعرف باسم ***الناقل العصبي*** . فتنتقل هذه المادة عبر الفلح المشبكي إلى عصبون آخر عند نقطة من نقاط تغصناته أو من جسمه نفسه (راجع الشكل 9 ـ 10) و هنا نجد أن بعض العصبونات لها مشابك ينطلق منها ناقل عصبي كيماوي يهدف إلى ***حض*** العصبون التالي على " القدح " أي على البدء بإشارة جديدة تنتقل على طول محوره، و تدعى هذه المشابك ***حاضّات*** excitatory ، كما أن هناك عقداً مشبكية أخرى تعمل على كبح العصبون التالي عن القدح وتدعى ***صادّات*** inhibitory. وفي كل لحظة ينضاف مفعول المشابك العاملة الحاضة كلها بعضها إلى بعض، و يطرح منه مفعول المشابك العاملة الصادة كلها . فإذا وصلت النتيجة الصافية إلى عتبة حرجة معينة ، عندئذ يستثار العصبون التالي فعلاً و يقدح، (أي يطلق إشارته). و مما يجدر ذكره أن المشابك الحاضة تسبب فرقاً كمونياً كهربائياً موجباً بين داخل العصبون التالي وخارجه، كما تسبب المشابك الصادة فرقاً كمونياً سالباً. و ينضاف هذان الفرقان الكمونيان أحدهما إلى الآخر بالصورة المناسبة، فلا يقدح العصبون التالي إشارته إلا حين يبلغ هذا الفرق الكموني

على المحور المرتبط، مستوياً حرجاً لايتاح معه للبوتاسيوم أن يخرج بالسرعة الكافية ليعيد التوازن .

النماذج الحاسوبية

يتصف النقل العصبي بخاصة مهمة هي أن الإشارات (في معظم الأحوال) هي ظواهر من النوع " الكل ــ أو لا شيء ". أي أن شدة الإشارة لا تتغير ، فهي إما موجودة و إما لا. مما يضفي على طريقة عمل الجملة العصبية مظهر آلة حاسبة رقمية. وهذا بالفعل ما يظهر من أوجه الشبه العديدة بين الطريقة التي تعمل بها مجموعة كبيرة من العصبونات المترابطة فيما بينها وطريقة العمل في داخل الحاسوب الرقمي مع ما فيه من أسلاك حاملة للتيار وبوابات منطقية (هي ما ستتحدث عنه أكثر بعد حين). وليس صعباً مبدئياً صنع حاسوب يحاكي بعمله عمل جملة عصبية كهذه. ولكن السؤال الطبيعي الذي يتبادر عندئذ للذهن هو : ألا يعني ذلك أنه يمكن دائما إيجاد نموذج آلة حاسوبية تشبه الدماغ في طريقة عمله مهما كان شكل تفاصيل شبكة الأعصاب فيه ؟

وهنا لا بد لي، لكي ألقي مزيدا من الضوء على هذه المقارنة، من أن أوضح ما هي " البوابة المنطقية" بالضبط . لقد رأينا أن لدينا في الحاسوب أيضاً موقفاً مماثلاً لـ " الكل أو لا شيء ". فإما أن هناك " نبضة " تيار تجري في السلك، و إما لا، كما أن شدة النبضة ــ إذا وجدت ــ تظل هي نفسها دائماً. ولما كان كل شيء موقتاً توقيتاً دقيقاً جداً، فغياب النبضة إذن هو إشارة لا لبس فيها، ولا بد أن يكون أمراً يتحسسه الحاسوب. فاستخدامنا للتعبير " بوابة منطقية " يقصد به في حقيقة الأمر توجيه فكرنا إلى وجود نبضة تيار أو غيابها كأمرين يدلان على" الصح " و " الخطأ " على الترتيب . و لكن وجود التيار و عدمه ليس له علاقة في الواقع بـ " الحقيقة " و " الخطأ" الفعليين. فليس لهذا المصطلح من هدف سوى أن يجسد التعبير الذي يستخدم عادة . فدعونا نكتب "1" أيضا للدلالة على " الصح " (وجود نبضة)، و " 0 " للدلالة على " الخطأ " ، (أي غياب النبضة) ، فنستطيع أن نستخدم هنا، كما في الفصل الرابع ، الرمز $\wedge$ " لـ " و " ((و هو الحكم الذي يقرر أن الإثنين " صحيحان "، أي أن الجواب يكون 1 إذا وفقط إذا كانت الدعويان معاً 1)، ونستخدم الرمز "V" لـ " أو " (و هو الحكم الذي يقرر أن واحدة من الدعويين أو الإثنتين " صح "، أي لا يكون صفراً إلا إذا كانت الدعويان صفراً)، ونستخدم الرمز $\Rightarrow$ للاقتضاء (أي $A \Rightarrow B$ تعني إذا كانت A صحيحة تكون B صحيحة، و هذا يكافيء : " إما A خطأ أو B صحيحة " (ونستخدم الرمز $\Leftrightarrow$ لـ " إذا وفقط إذا " (و هو يقرر أن الدعويين صحيحتان أو أنهما خطأ). ونستخدم الرمز " ~ " لـ للنفي (لا) و هو يدل على أن الحكم صحيح ، إذا كانت الدعوى خطأ،

وخطأ إذا كانت صحيحة) . و يمكن أن نعبر عن واقع هذه العمليات المنطقية المختلفة بدلالة ما يدعى حداول الحقيقة :

$$A \& B: \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \qquad A \vee B: \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 1 \end{pmatrix}$$

$$A \Rightarrow B: \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \qquad A \Leftrightarrow B: \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

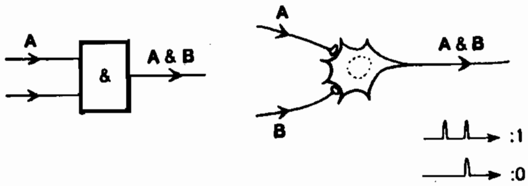
حيث نفترض A تشير إلى الأسطر (بحيث A = 0 يشير إلى السطر الأول و A = 1 يشير إلى السطر الثاني)، ونفترضB تشير إلى الأعمدة (بحيثB = 0 يشير إلى العمود الأول وB = 1 إلى العمود الثاني). فعلى سبيل المثال : إذا كانت A = 0 وB = 1 ، فهذا يعني أخذ المدخل الواقع في السطر الأول و العمود الثاني في كل جدول من الجداول الأربعة . ففي الجدول الثالث (الأسفل من اليسار) نحصل على القيمة 1 لأجل A ⇒ B (ولكي نؤكد صحة هذه القيمة نعطي مثالاً من كلامنا يعبر عن المنطق الفعلي (المتداول) فتأكيدي على أنني " إذا نمت، أكون سعيدا " هو قول لا غبار عليه حتماً لدرجة أنه تافه ولاسيما أن حالي يؤيده إذا ظللت مستيقظا و كنت سعيداً في آن واحد ، أي إذا خطأت فعل الشرط و هو النوم و مع ذلك كنت سعيداً) . و أخيرا يمكن التعبير عن البوابة " غير " أو " لا[أي النفي] بالصورة التالية:

$\sim 0 = 1$ و $\sim 1 = 0$

وبذلك نأتي على ذكر نماذج البوابات المنطقية الأساسية، مع العلم أن هناك أخرى قليلة غيرها، ولكنها جميعا يمكن التعبير عنها بدلالة هذه التي ذكرناها (6) .

والآن لنتساءل : هل نستطيع مبدئيا صنع حاسوب على طريقة الروابط ***العصبونية*** ؟ سأبين أن هذا ممكن فعلاً حتى بملاحظات بدائية جداً مماثلة للتي رأيناها عن طريقة قدح العصبونات، فدعونا نرى كيف يمكن مبدئياً عمل بوابات منطقية من روابط عصبونية، إننا سنحتاج أولا إلى نظام إشارات جديد للدلالة على الأرقام ، إذ إن غياب الإسارة لا يؤدي إلى إطلاق أي شيء. لذلك دعونا نصطلح (بمحض اختيارنا) على أن النبضة المضاعفة تعني 1 (أو " صح ") والنبضة البسيطة تعني الصفر 0 (أو " خطأ ")، ولنتخذ مخططاً أولياً مبسطاً لا يبدأ فيه قدح العصبون إلا بنبضتين متزامنتين حاضتين. و الآن أصبح من السهل تصميم بوابة " و " (أعني ∧). فالشكل 9 ـ 13 يبين كيف يمكننا جعل ليفيْ الإدخالات العصبيين ينتهيان عند العقدتين المشبكيتين الوحيدتين على عصبون المخرجات، (فإذا كانت النبضتان الآتيتان معا مضاعفتين، عندئذ تتوصلان معاً، الأولى والثانية، إلى عتبة النبضتين المطلوبة مرة بعد مرة لقدح

نبضة مضاعفة واحدة في العصبون . في حين أنه إذا كانت أي نبضة من النبضتين الآتيتين هي مجرد نبضة بسيطة فعندئذ لن يصل إلى العتبة سوى نبضة واحدة منهما. مع افتراضنا أن النبضات موقوتة بعناية وأن النبضة الأولى، في حالة النبضة المضاعفة، هي لتوخي الدقة، من بين النبضتين، التي تحدد التوقيت)[x] .



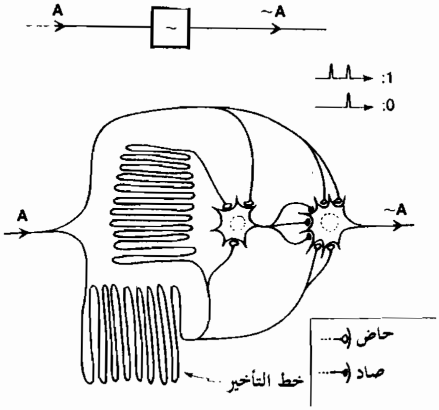
الشكل 9 ـ 13 : إحدى بوابات العطف " و " : لا يبدأ العصبون بالعمل في " نموذج العصبون " (إلى اليمين) إلا عندما يكون الداخل فيه ضعف شدة النبضة المفردة.

دعونا نرى الآن مخططا لبوابة النفي " لا " (أعني " ~ ") . إن المخطط في هذه الحالة أكثر تعقيداً بكثير. وقد مثلنا في الشكل 9 ــ 14 إحدى طرق تكوينه. ففي هذه الحالة تأتي الإشارة الداخلةA على امتداد عصبون محوري ينقسم إلى فرعين، فيتخذ أحدهما طريقاً ملتوياً غير مباشر لكي يؤخر طوله الإشارة مدة تساوي بالتحديد الفترة الزمنية بين النبضتين في حال نبضة مضاعفة. ثم يتفرق الطريقان كلاهما مرة أخرى، فينتهي فرع من كل منهما عند عصبون صاد، و لكن أحد الفرعين في الطريق الملتوي يتفرع أيضاً، قبل الوصول إلى العصبون الصاد، إلى طريقين أحدهما مباشر و الآخر غير مباشر. إن مخرج هذا العصبون هو لا شيء في حالة دخول نبضة بسيطة، وهو نبضة مضاعفة (في الوضع المؤخر) في حال دخول نبضة مضاعفة. ثم يتفرع المحور الحامل لهذا المخرج السابق إلى ثلاثة فروع، ينتهي كل منها بعقدة مشبكية صادة عند عصبون حاض نهائي. أما القسمان الباقيان من المحور الأصلي ، فينقسم كل منهما إلى إثنين مرة أخرى ، و تنتهي الفروع الأربعة أيضاً عند العصبون النهائي و لكن في عقد مشبكية حاضة في هذه الحالة. ويمكن للقارىء أن يقوم بنفسه بالتأكد بأن هذا العصبون الحاض النهائي يعطينا المخرج " لا " المطلوب (أعني نبضة مضاعفة إذا كانت المدخلة بسيطة ، و نبضة بسيطة إذا كانت المدخلة مضاعفة). (قد يبدو هذا المخطط معقداً تعقيداً سخيفاً، ولكنه

---

[x] أو باختصار إذا وصلت إلى العصبون نبضتان معاً واحدة من كل محور، فإنه ينبض نبضة بسيطة واحدة، و إذا وصلت معاً من كل محور نبضتان متتاليتان ينبض بنبضة مضاعفة واحدة.

أفضل ما أستطيع عمله). كما يمكن للقارىء أن يسلي نفسه بإيجاد تصاميم عصبونية للبوابتــين المنطقيتين الباقيتين .



الشكل 9 ــ 14 : إحــدى بوابات النفي " لا " . لابد في " النموذج العصبوني " أيضا من مدخل مضاعف الشدة (على الأقل) لكي يطلق العصبون إشـــارته

ولنلاحظ هنا أن هذه الأمثلة الواضحة لم تعرض طبعا لكي تعد نماذج جدية لما يفعله الدماغ حقيقة بالتفصيل، بل هي محاولة فحسب لإظهار أن هنــاك تكـافؤاً منطقيـاً أساسـياً بـين نمـوذج قدح العصبونات الذي سبق لي عرضه، و البناء الحاسوبي الإلكتروني. الأمر الذي يسـهل علينـا أن نرى كيف يمكن لحاسوب ما أن يحاكي أي نموذج للارتباطات العصبونية مثـل هـذا. كمـا تعطي التصاميم المفصلة أعلاه دليلاً على الحقيقة المعاكسة التالية، وهــي أن المنظومـات العصبيـة قادرة على محاكاة الحاسوب ـ فتستطيع أن تقوم على هذا النحو مقام آلة " تورنغ " (عامة). إذ على الرغم من أن دراستنا لآلات تورنغ الواردة في الفصل الثاني لم تستخدم البوابـات المنطقيـة (7) التي نحتاج بالأحرى، في حقيقة الأمر، لأكثر منها وحدها إن نحن أردنا محاكاة آلة عامة من آلات تورنغ ، إلا أن هذا لا يعني أن في الأمر مسألة مبدئية جديدة يجب حلها ــ هذا ***بشرط*** أن نسمح لأنفسنا بأن ***تقارب الشريط اللانهائي*** لآلة تورنــغ برصيـد مـن العصبونـات كبـير جـداً ولكنه منته. وهذا ما قد يبدو بأنه محاولة لإثبات أن الأدمغة و الحواسيب متكافئة في أساسها.

ولكن قبل أن نتسرع كثيراً ونثب إلى هذه النتيجة، علينا أن نراعـي فروقـا مختلفـة يمكـن أن تكون ذات شأن كبير بين عمل الدماغ و عمل حاسوب من الحواسيب الحديثـة. ففـي وصفـي لعملية قدح العصبون بأنها ظاهرة من ظواهر" الكل ــ أو ــ لا شيء " كنت قـد بـالغت بعـض الشيء في تبسيط هذا الوصف الذي تحدث عن نبضة واحدة تنتقل علـى طـول المحور، و لكـن الحقيقة هي أن العصبون يصدر عند قدحه سلسلة كبيرة مــن النبضـات بتعـاقب سـريع. بـل إن العصبون ينبض حتى حين لا يكون محرضاً، و لكن بمعدل بطيء جداً. ***وتواتــر*** نبضاتـه المتعاقبـة

هذه هو الذي يتزايد تزايدا هائلا عند قدحه. يضاف إلى ذلك ، وجود جانب احتمالي في قدح العصبون. إذ لا يؤدي المحرض نفسه إلى النتيجة ذاتها دائماً، ثم إن أداء الدماغ ليس له التوقيت المضبوط تماما الذي تحتاجه تيارات الحاسوب الإلكتروني. وهنا يجب أن يشار إلى أن لنشاط العصبونات سرعة ــ و هي حول 1000 مرة في الثانية في أقصى معدل له ــ أبطأ بكثير جداً من نشاط أسرع الدارات الإلكترونية بنسبة تقرب من 10^{-6}. ولا مثيل في الدماغ أيضاً لدقة التوصيلات الكبيرة في الحاسوب الإلكتروني، إذ يبدو أن هناك قدرا كبيرا من العشوائية والإفراط في الطريقة المفصلة التي ترتبط بها العصبونات فعلاً ــ على الرغم من أننا نعرف الآن أن هناك دقة في طريقة التوصيل في الدماغ (عند الولادة) أكبر بكثير جدا مما كان يظن منذ ما يقرب من خمسين عاماً.

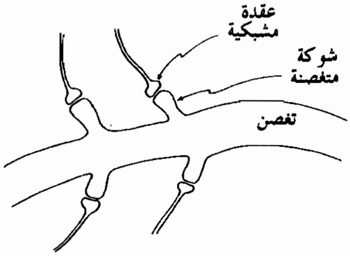
قد يبدو بسهولة أن معظم ما ذكر أعلاه يسيء إلى سمعة الدماغ عند مقارنته مع الحاسوب، ولكن ثمة عوامل أخرى لصالح الدماغ. ففي البوابات المنطقية، لا يوجد سوى أسلاك إدخال و إخراج قليلة جداً (ثلاثة أو أربعة على الأكثر). في حين أنه يمكن أن يتوافر على العصبونات أعداد هائلة من المشابك (مثال صارخ على ذلك، عصبونات المخيخ المعروفة باسم خلايا بركينج Purkinje التي لها ما يقرب من 80000 نهاية مشبكية حاضة).

ثم إن عدد العصبونات في الدماغ، لا يزال يفوق بكثير عدد الترانزستورات، حتى في أكبر الحواسيب ـ ففي الدماغ يقدر العدد بـ 10^{11}، أما في الحاسوب فيقرب من 10^{9}"فحسب" ! (ولكن هذا الرقم في الحاسوب سيزداد طبعا في المستقبل (8) على الأرجح) أضف إلى ذلك أن ضخامة عدد الخلايا الدماغية ترتفع جداً بالعدد الهائل من الخلايا الحبيبية الصغيرة التي عثر عليها في المخيخ ــ فهو حول ثلاثين ألف مليون (3×10^{10}). وإذا نحن صدقنا أن موهبة وعينا لتجاربنا ناشئة عن وجود عدد هائل فحسب من العصبونات في الدماغ ، (في حين أن الحواسيب الحالية لا يبدو أن لها مثل ذلك) عندئذ علينا أن نبحث عن تفسير جديد يبين لنا لماذا يبدو عمل المخيخ لا شعورياً محضاً، على الرغم من أن العصبونات موزعة فيه بكثافة أكبر بكثير مما هي في المخ ، كما أن المخ الذي يقترن فيه الشعور لا يملك من العصبونات أكثر بكثير من ضعفي المخيخ تقريباً (حول 7×10^{10}).

مرونة الدماغ

ثمة نقاط اختلاف أخرى بين عمل الدماغ و عمل الحاسوب تبدو لي ذات أهمية أكبر بكثير من تلك التي سبق لي ذكرها،وهي تتعلق بظاهرة تعرف باسم "مرونة الدماغ"،ففي وقتنا الراهن لا يحق لنا أن ننظر إلى الدماغ بأنه مجرد مجموعة ثابتة من العصبونات المحاطة بشبكة من الأعصاب. لأن ترابطها فيما بينها ليس ثابتاً، في الحقيقة، كما هو الحال في نموذج الحاسوب المذكور أعلاه، بل يتغير طيلة الوقت. و لا أعني بذلك أن مواضع المحاور والتغصنات تتغير إذا

سبق أن استقرت هذه الشبكة من التوصيلات في خطوطها العريضة منذ الولادة، بل إن ما عنيته هو العقد المشبكية. فعن طريقها تتم الاتصالات بين مختلف العصبونات.و يحدث ذلك غالباً في



الشكل 9 ــ 15 : يمثــل هــــذا الشكل وصـــلات مشــبكية عــن طريــق أشــواك تغصنية ، و بحسب تضخم الشوكة و انكماشها ، تتغيرحــالا فعــاليــــة الربط

المواضع التي تدعى أشواك تغصنية **dendritic spines** ، و هــي نتـوءات ضئيلـة علـى التغصنـات يمكن أن يتم عندها الاتصال مع العقد المشبكية (أنظر الشكل 9 ــ 15) . و كلمة " اتصال " هنا لا تعني التماس بالتحديد ، بل ترك هوة ضيقـة (هـي الفلـح المشـبكي) علـى قـدر المسـافة المطلوبة تماما ــ و هي تقرب من جزء من أربعين ألفاً من المليمتر . و الآن يمكــن لهـذه الأشـواك التغصنية أن تنكمش نهائيا و تحطم كل اتصـال أو يمكـن أن تنمـو (أو ينمـو غيرهـا جديـدة) لتوفر اتصالا جديدا . لذلك إذا فكرنا في اتصالات العصبونات في الدماغ بأنها حاسوب فعلاً، فهذا الحاسوب عندئذ هو من نوع يمكنه التغير طيلة الوقت .

وتقول إحدى النظريات البارزة في كيفية تخزين الذكريات الطويلة الأجل، إن هذا التغير في الارتباطات المشبكية هو الذي يوفر وسائل تخزين المعلومات الضرورية. فإذا صح ذلـك، عندئـذ لا نستطيع أن ننظر إلى مرونة الدماغ بأنها مجرد تعقيد عرضي ، بل هي ميزة ***أساسية*** في نشــاط الدماغ .

ولكن ما هي الآلية الكامنة وراء هذه التغيرات الدائمة ؟ وما مدى السرعة التي يمكن أن تتم فيها ؟ يبدو أن الإجابة عن السؤال الثاني مثيرة للجدل، وعلى رغم ذلك ثمـة مدرسـة تعمـل في مجال التفكير تتمسك بالقول إن هذه التغيرات يمكن أن تحدث في ثوان. وهذا ما يجب أن نتوقعه إذا صح أن هذه التغيرات مسؤولة عن تخزين الذكريات الدائمة، لأن هذه الذكريـات يمكـن أن تحفظ فعلاً في غضون ثوان (راجع كاندل **1976 Kandel**) وهــذا مـا سـيترتب عليـه فيمـا بعـد نتائج مهمة بالنسبة لنا، سأعود إليها في الفصل التالي .

ثم ماذا عن الآليات الكامنـــــة وراء مرونـــة الدماغ ؟ تقترح إحــدى النظريـات العبقريـة (وتنسب إلى د. هب **1954 Donald Hebb**) وجود بعض المشـابك الـتي تدعـى الآن "مشـابك هب " تتميز بالخاصة التالية : إن مشبكاً (من مشـابك هــب) بـين عصبـونA و عصبـونB يقوى كلما تبع قدحA قدحB و يضعف إذا لم يحدث ذلك، هذا بغض النظـر عـن أن مشـبك

هب يشارك مشاركة فعالة في تسبب قدحB (أو لا). و هذا ما يؤدي إلى أحد أشكال التعلم. و لقد قدمت نماذج رياضية مختلفة تحاول محاكاة عملية تعلم حل المسائل بالاستناد إلى نظرية كهذه عرفت باسم نماذج ***الشبكات العصبونية***. ويبدو أنها قادرة فعلاً على نوع من التعلم البدائي. ولكن لا يزال أمامها إلى الآن طريق طويل لتصبح نماذج حقيقية للدماغ. و مهما يكن من أمر، فإنه يبدو من المرجح أن الآليات التي تضبط التغيرات في الارتباطات المشبكية هي أعقد على الأرجح من تلك التي درست، فنحن بحاجة إذن إلى مزيد من الفهم.

ويوجد في مجال هذه الآليات شكل آخر لتفريغ النواقل العصبية عن طريق العقد المشبكية، ففي بعض الأحيان لا يظهر هذا التفريغ إطلاقاً في الفلوح المشبكية، بل يدخل في السائل العام بين الخلوي ليؤثر في عصبونات أخرى بعيدة جداً. ويبدو أن هناك مواد كيماوية عصبية مختلفة تبث بهذه الطريقة ـ و لا تزال هناك نظريات عديدة في الذاكرة تختلف عن تلك التي ذكرتها أعلاه، وهي تعتمد على مختلف الأنواع الممكنة من هذه المواد الكيماوية التي يمكن أن تقوم بهذه المهمة . و لا جدال في أن حالة الدماغ يمكن أن تتأثر بوجه عام بوجود المواد الكيماوية التي أنتجتها أقسام أخرى من الدماغ (ومثال على ذلك، حالة الحاثات [الهرمونات]). فمسألة الكيمياء العصبية بمجموعها مسألة معقدة، ويصعب علينا أن نرى كيف يمكن أن نعرض محاكاة حاسوبية موثوقة ومفصلة لكل الأمور الهامة المتعلقة بالدماغ .

الحواسيب المتوازية (التفرعية) و " أحادية " الشعور

يبدو أن الكثيرين يؤيدون الرأي القائل إن تطور الحواسيب ***المتوازية*** **parallel computers** هو الذي يطوي على مفتاح الحل لمسألة بناء آلة لها قدرات دماغ الإنسان. لذلك دعونا نرى فيما يلي باختصار هذه الفكرة الشائعة : إن الحاسوب المتوازي، بعكس التسلسلي يمكن أن ينفذ في آن واحد عددا كبيراً جداً من الحسابات المنفصلة (بصورة مستقلة) ثم لا يركب بعدئذ نتائجها المستقلة ذاتياً إلى حد بعيد، بعضها مع بعض إلا بشكل متقطع بحيث تشارك كلها في الحساب الشامل العام.

وكان الدافع الأساسي لهذا النمط من تصميم الحواسيب هو محاولة الاقتداء بطريقة عمل الجملة العصبية، إذ إن مختلف أقسام الدماغ تنفذ فعلا ، كما يبدو لنا، وظائف حسابية منفصلة و مستقلة (مثال ذلك : معالجة المعلومات المرئية في القشرة البصرية) .

وهنا يجب أن نشير إلى أمرين : أولهما أنه لا يوجد فرق ***من حيث المبدأ*** بين الحاسوب المتوازي و التسلسلي. فكلاهما في الحقيقة من ***آلات تورنغ*** (أنظر الفصل الثاني ص 77). والخلافات بينهما يمكن أن تكون فقط في فعالية الحساب بمجمله أو في سرعته، على الرغم من وجود أنماط حسابية يكون التنظيم المتوازي بالنسبة لها هو الأجدى فعلاً. ولكن الحال ليس كذلك دائماً إطلاقاً. والأمر الثاني هو أنه من المستبعد جداً ــ في رأيي على الأقل ــ أن يكون

مفتاح الحل الذي يؤدي إلى ما يناسب التفكير الواعي هو في طريقة الحواسيب المتوازية. إذ أن إحدى الخواص المميزة للتفكير ***الواعي*** هي أحاديته، وهذا يتعارض مع العدد الكبير من الفعاليات المستقلة السائرة معاً (هذا على الأقل عندما يكون المرء في حالة نفسية سليمة و ليس مصابا بعملية انشطار دماغي).

إن قولا من قبيل " كيف يمكنك أن تتوقع مني التفكير في أكثر من شيء واحد في الوقت نفسه ؟ " هو قول شائع . إذ هل يمكن الاحتفاظ في حال من الأحوال بأشياء منفصلة تجري معاً في آن واحد في وعي إنسان ؟ من الجائز أن يتمكن المرء من الاحتفاظ بأشياء قليلة تجري معاً، ولكن ذلك يبدو أشبه بتناوب الظهور و الاحتجاب بين مختلف الأمور منه بتفكير فعلي فيها كلها في آن واحد و بصورة واعية و مستقلة. ولو أن المرء كان يفكر تفكيراً واعياً في أمرين مستقلين تماماً لكان كمن يملك شعورين منفصلين، حتى و لو لفترة وجيزة فقط. في حين أن ما نعرفه بتجربتنا (في الحالة السليمة على الأقل) هو شعور واحد (أحادي) يمكن أن يكون واعياً وعياً مبهماً لعدد من الأشياء، و لكنه يتركز في أي لحظة على شيء واحد بعينه.

وما نعنيه طبعا بقولنا " على ***شيء واحد*** " هنا ليس واضحاً كل الوضوح. ففي الفصل التالي سنجد بعض الأمثلة البارزة جدا عن " الأفكار الوحيدة " في خواطر الإلهام عند بوانكاريه وموتسارت Mozart و لكن ليس ضرورياً أن نذهب بعيداً جداً لكي نعرف أن ما يمكن أن يعيه المرء في لحظة واحدة يمكن أن يكون ضمنياً معقداً جداً (مع أنه شيء واحد). و يكفي لأجل ذلك أن نتصور أحدهم و هو يقرر ماذا يمكن أن يكون لديه على العشاء. عندئذ يمكن أن تكون هناك كمية كبيرة من المعلومات المنطوية تحت هذه الفكرة الموجودة في حيز الشعور، أما الوصف الكلامي الكامل فقد يكون طويلاً جداً.

فهذه " الأحادية " التي يتصف بها إدراكنا الموجود في ساحة الشعور تبدو لي متعارضة كل التعارض مع صورة الحواسيب المتوازية . أما إذا كان ثمة ما هو أنسب لهذه الصورة (صورة الحواسيب المتوازية) فهو أن تكون نموذجا لنشاط الدماغ ***اللاشعوري***. إذ إنه من الممكن تنفيذ حركات مختلفة مستقلة ـــ كالسير و تثبيت الزرار والتنفس أو حتى الكلام ، كلها معا ، وبتلقائية متفاوتة ومن دون أن يكون المرء واعيا في شعوره لأي واحد من هذه الأمور .

هذا من جهة، ومن جهة أخرى، يبدو لي أنه قد يكون من المعقول وجود علاقة من نوع ما بين " أحادية" الشعور ***والتوازي الكمومي***. فعلى الصعيد الكمومي، تسمح النظرية كما نذكر، بوجود خيارات مختلفة في انضمام خطي كلها معاً. لذلك يمكن مبدئياً أن تتألف حالة كمومية واحدة من عدد كبير من الفعاليات المختلفة التي تحدث كلها معاً، الأمر الذي عنيناه بعبارة توازي كمومي. وسنرى بعد قليل فكرة " الحاسوب الكمومي " النظرية التي يمكن مبدئياً أن تستخدم هذا التوازي الكمومي لإنجاز عدد كبير من الحسابات في آن واحد. فإذا أمكن بعدئذ تقريب أوجه الشبه بين الحالة العقلية الواعية (الموجودة في ساحة الشعور) و الحالة

الكمومية، فعندئذ يمكن أن يبدو شكل من أشكال " أحادية " التفكير أو شموليته أنسب لهذه الحالة الكمومية مما يمكن أن يكون عليه حال الحاسوب المتوازي العادي. و هناك جوانب جذابة لهذه الفكرة التي سأعود إليها في الفصل التالي. و لكن قبل أن يتاح لهذه الفكرة أن تصبح موضع تفكير جدي ، علينا أن نثير مشكلة التأثيرات الكمومية و هل يحتمل أن يكون لها، بحال من الأحوال ، صلة ما بنشاط الدماغ .

هل ثمة دور لميكانيك الكم في نشاط الدماغ ؟

لقد كانت دراستنا أعلاه للنشاط العصبوني بأكملها كلاسيكية فعلا ما عدا القسم الأخير عندما احتاج الأمر إلىالاستعانة بظواهر فيزيائية تعود أسبابها الخفية ضمنا في جانب منها إلى ميكانيك الكم (مثال ذلك : الأيونات وشحناتها الكهربائية المؤلفة من وحدات، و بوابات الصوديوم والبوتاسيوم، و الإمكانات الكيماوية الواضحة التي تحدد للشحنة العصبية طبيعة إيقافها و تسييرها) . و لكن هل أن لعملية التحكم الكمومي الحقيقي دورا أبرز من هذا يمكن أن تقوم به في موضع استراتيجي ؟ يبدو أن وجود هذا الدور أمر محتم إذا كان للمناقشة التي جرت في نهاية الفصل السابق أي دور حقيقي وثيق الصلة (بوظيفة الدماغ) .

بالفعل، هناك موضع واضح، واحد على الأقل ، يمكن أن يكون فيه للنشاط الذي يجري في المستوي الكمومي وحده أهمية بالنسبة للنشاط العصبي، و هذا الموضع هو الشبكية (فهي كما نذكر من الوجهة الفنية ، جزء من الدماغ). فقد أجريت تجارب على الضفدع تبين فيها أن سقوط فوتون وحيد، ضمن شروط مناسبة، على الشبكية المتآلفة مع الظلام، يمكن أن يكفي لإطلاق إشارة عصبية جهرية **Lamb** ، **Yau 1979**). ويبدو أن هذا الأمر نفسه صحيح عند الإنسان (**Hecht** ، **Shlaer** ، **Pirenne 1941**) ، و لكن يوجد في هذه الحالة آلية إضافية جاهزة تحذف مثل هذه الإشارات الضعيفة، فلا تخلط الصورة المدركة مع مثل هذا "التشويش " البصري الكثير جداً . والحقيقة أن الإنسان الذي تآلف مع الظلمة يحتاج إلى إشارة مركبة من سبعة فوتونات لكي يصبح بإمكانه أن يعي وصولها. ومع ذلك يبدو أن هناك خلايا في شبكية الإنسان حساسة لفوتون وحيد .

ولما كان جسم الإنسان ***يحوي*** عصبونات يمكن قدحها (أي إطلاق إشارتها) بتعرضها لكم وحيد، لذلك، أليس من المعقول أن نتساءل أفلا يمكن لخلايا من هذا النوع أن توجد في مكان ما في القسم الرئيسي من دماغ الإنسان ؟ بحسب علمي لا يوجد تأكيد بهذا الشأن. إذ تتطلب جميع أنماط الخلايا التي فحصت، وصول التأثير إلى عتبة (معينة)، بمعنى أنها تحتاج إلى عدد كبير جداً من الكموم لكي تطلق إشارتها. ومع ذلك، يمكن للمرء أن يفكر بأن هناك في مكان ما عميق في الدماغ، خلايا تتحسس بكم وحيد لابد سيعثر عليها. وإذا ثبت أن الأمر كذلك، فعندئذ سيكون ميكانيك الكم مشاركا مشاركة فعالة في نشاط الدماغ .

ولكن حتى لو ثبت هذا فإنه لن يبدو واقعاً كمومياً *مفيداً جداً* ما دام استخدام الكم فيه مقتصراً على كونه وسيلة لإطلاق الإشارة، إذ لم يعثر على آثار تداخل كمومي مميز . و يبدو أن كل ما سنحصل عليه من إثبات ذلك، هو في أحسن الأحوال، شك في معرفة هل سيقدح العصبون المعني أم لا، كما يصعب علينا أن نرى كيف سيكون ذلك ذا فائدة كبيراً لنا .

ومع ذلك، فإن بعض المسائل التي أثيرت هنا ليست بهذه البساطة. لذلك دعونا نعود وننظر في أمر الشبكية ولنفرض أن فوتونا قد وصل إليها بعد أن سبق له الانعكاس على مرآة نصف شفافة، فحالته تتضمن انضماماً خطياً مكوناً من حالة اصطدامه بإحدى خلايا الشبكية ومن حالة عدم اصطدامه بأي واحدة منها و انصرافه مثلاً، بدلاً من ذلك، من النافذة في الفضاء (أنظر الشكل 6 ــ 17). فعندما نصل إلى اللحظة التي يكون قد أمكنه الاصطدام بالشبكية وطالما أن قاعدة النظرية الكمومية الخطية U تظل صحيحة (أعني بذلك تطور متجهة الحالة الحتمي عند شرودنغر. أنظر ص 301)، عندئذ سيكون أمامنا حالة انضمام خطي عقدي مكون من حالة وجود إشارة عصبية، وحالة عدم وجود إشارة. فعندما تترك هذه الإشارة أثرها في شعور الإنسان، يدرك هذا واحداً فحسب من هذين الخيارين، و عندئذ يجب أن يكون الإجراء الكمومي الثاني R (اختزال متجهة الحالة، أنظر ص 301) قد تم عمله. وعندما أقول ذلك، أكون قد تجاهلت وجهة نظر العوالم المتعددة ــ أنظر ص 350 ــ التي لها مشاكلها الخاصة العديدة !). فسيراً على نهج الملاحظات التي تحدثنا عنها قليلاً في نهاية الفصل السابق، يجب أن نسأل : هل تضطرب بمرور الإشارة، مادة كافية يمكن أن يتحقق لأجلها معيار الغرافيتون *الوحيد* الذي تحدث عنه ذلك الفصل فعلى حين أن الشبكية تقوم حقاً بتضخيم هائل ومذهل من مرتبة 10^{20} ــ يؤدي إلى تحويل طاقة الفوتون إلى حركة كتلة، لكي تبعث الإشارة فإن هذه الكتلة تظل قطعاً أصغر من كتلة بلانك m_p بنسبة كبيرة جداً (ولنقل حول 10^8). ومع ذلك، فإن الإشارة العصبية تولد *حقلاً كهربائياً متغيراً* قابلاً للكشف عنه في محيطه (إنه حقل حلقي محوره العصب، وينتقل على طول هذا العصب) وباستطاعة هذا الحقل أن يثير اضطراباً واضحاً *فيما حوله*، ومن السهل عندئذ أن نصادف " معيار الغرافيتون الوحيد " داخل هذا المحيط. وهكذا فإنه تبعا لوجهة النظر التي سبق لي أن عرضتها ، يمكن للإجراء R أن يكون قد تم حدوثه سابقاً قبل أن ندرك وميض الضوء، أو قبل عدم إدراكه. وهذا بحسب ما تكون الحالة الفعلية من الحالتين المذكورتين آنفا. وبناء على وجهة النظر هذه لا حاجة لشعورنا لكي يختزل متجهة الحالة !

لقد انسقنا إلى حد ما في تأملاتنا السابقة إلى التفكير في أن العصبونات الحساسة لكمّ وحيد تقوم بدور هام في عمل الدماغ، لذلك يمكن أن نتساءل هنا مـا هـي النتـائج الـتي تـترتب علـى ذلك ؟ و لكن قبل أن نجيب عن هذا السؤال علينا أن نناقش في البدء مفهـوم دوتـش Deutsch عن الحاسوب الكمومي (أنظر أيضا الفصل الرابع ص 185) ثم نتساءل هل يمكن لهذا المفهـوم أن يلقي مزيداً من الضوء على فكرتنا هذه ؟

إن الفكرة الأساسية هي، بحسب ما ذكر أعلاه، استخدام التوازي الكمومي الـذي يعـني أن هناك شيئين مختلفين كل الاختلاف يجب أن ينظـر إليهمـا بأنهمـا يحدثـان معـا في آن واحـد في انضمام كمومي خطي ــ مثل الفوتون الذي ينعكس على المرآة نصف الشفافة و يمر في الوقـت نفسه خلالها، أو ذاك الذي يمر في آن واحد خلال كل شق من الشقين. فالسـلوكان المختلفـان المنضمان معا في مثل هذه الحالات هما في الحاسوب الكمومـي حسبتان مختلفتـان. وهنـا لسـنا مكلفين بأن نهتم بالحصول على أجوبة كلا الحسبتين، بل نهتم بشيء يستخدم معلومات جزئية مستخلصة من ***الحسبتين*** المنضمتين. وأخيراً لابـد مـن اللجـوء عنـد انتهـاء الحسـبتين إلى إجـراء "الرصد" المناسب عليهما للحصول على الجواب المطلوب (9). فيمكن للآلـة بهـذه الوسـيلة أن توفر الوقت بإنجاز حسبتين في آن واحد ! ومع ذلك، قد يبدو أننا لم نجن شيئا مهما حتـى الآن من اللجوء إلى هذه الوسيلة. إذ لا شك بأن استخدام حاسوبين كلاسيكيين منفصلـين سـيعطي فائدة مباشرة اكثر عن طريق أقصر بكثير من استخدام حاسوب كمومي. ومع ذلك فإن الربـح الحقيقي من الحاسوب الكمومي يمكن أن يأتي حين تكون هناك حاجـة لاسـتخدام عـدد كبـير جداً من الحواسيب المتوازية ــ التي لن تهمنا أجوبتها الفردية، بل سيهمنا التركيب المناسب مـن جميع النتائج معاً.

وإذا دخلنا في التفاصيل نجد أن إنشاء حاسوب كمومي سيتطلب ترجمة كمومية لبوابـة مـن البوابات المنطقية التي سيكون المخرج منها هو نتيجة " عملية واحدية " طبقت على المدخـل ــ وهذا مثال عن فعل U ــ فكل ما يجب أن يقوم به الحاسوب هو أن ينفذ الإجراء U مـن بدايتـه حتى نهايته تماماً إلى أن يؤدي " فعل الرصد " الختامي إلى إدخال الإجراء R.

وبحسب تحليل دوتش ، لا يمكـن لحواسيب كموميـة أن تستعمل لإنجاز عمليـات ليسـت خوارزمية (أعني أشياء لا طاقة لآلة تورنغ بها)، و لكنهـا تسـتطيع في بعـض الحـالات المعقـدة جدا أن تعمل بالمعنى المقصود في ***نظرية التعقيد*** (أنظر ص 180) بسرعة أكـبر مـن سـرعة آلـة تورنغ القياسية. فهذه النتائج هي، حتى الآن، مخيبة للآمال، بعض الشيء إذا قسناها مع روعـة الفكرة نفسها. و لكن لا يزال الوقت مبكرا لإعطاء حكم نهائي.

ترى كيف يمكن أن توجد أوجه شبه بين هذه الحواسيب الكموميـة الـتي وصفناهـا، و بـين عمل دماغ يحوي عدداً كبيراً من العصبونات الحساسة لكم وحيد ؟ لابد أن المشـكلة الرئيسـية

في التماثل هي أن التأثيرات الكمومية يمكن أن تضيع بسرعة في " الضجيج " ــ فالدماغ هو جسم " حار " لا يمكنه أن يحافظ على التماسك الكمومي (أعني أن لايحافظ على سلوك يوصف عادة باستمرار فعل (U خلال أي مدة زمنية طويلة . فلابد أن ذلك يعني ، بحسب مفاهيمي الخاصة، أن معيار الغرافيتون الوحيد لابد أن يظل يتكرر باستمرار بصورة يظل الإجراء R معها متابعا عمله طيلة الوقت و يقاطعه بين حين و آخر الإجراء U.

لا يبدو إلى الآن أن تلك الأمور مبشرة جدا فيما لو توقعنا الحصول على شيء مفيد لأجل الدماغ من ميكانيك الكم. ربما يكون قد حكم علينا بأن نكون ، في النهاية ، حواسيب ! إنني شخصيا لا أعتقد ذلك . ولكن لابد لنا من مزيد من التأملات إذا أردنا العثور على مخرج.

ما بعد نظرية الكم

أود أن أعود إلى قضية كانت موضوعا يبطن معظم مواضيع هذا الكتاب. و هي هل الصورة التي تكونت لدينا عن عالم تحكمه قواعد النظريتين الكلاسيكية والكمومية، كما نفهم قواعدهما حالياً، هي فعلاً كافية لوصف دماغنا و عقلنا ؟ لا شك أن أي وصف كمومي "عادي" لدماغنا سيظل دائماً أحجية محيرة، ما دام " فعل الرصد " يعتبر مقوماً أساسياً لتأويل نظرية الكم التقليدية تأويلا صحيحاً. ترى هل يجب أن ينظر إلى الدماغ بأنه "يرصد نفسه " كلما ظهرت فكرة أو إدراك في ساحة الشعور ؟ إن النظرية التقليدية لا تزودنا بقاعدة واضحة تبين لنا كيف يمكن لميكانيك الكم أن يدخل مسألة الرصد هذه في حسابه و يطبقها بعدئذ على الدماغ بمجموعه. و لقد حاولت أن أضع معيارا يحدد بداية تدخل الإجراء R بحيث يكون مستقلا تماماً عن الشعور (و نعني به معيار الغرافيتون الواحد). ولو أمكن تطوير شيء من هذا القبيل في نظرية كلية التماسك ، لأمكن عندئذ إبراز طريقة لإعطاء وصف كمومي للدماغ أوضح مما هو لدينا حالياً

ومهما يكن من أمر، فأنا أؤمن أن هذه المشاكل الأساسية (الكمومية الطابع) لا تبرز فحسب عند محاولتنا وصف عمل الدماغ. بل إن عمل الحواسيب الرقمية نفسه مرتبط ارتباطاً حيويا بالآثار الكمومية ــ وهي في رأيي، آثار ليست مستقلة استقلالا تاما عن الصعوبات الدفينة في نظرية الكم. ولكن ما هو هذا الارتباط الكمومي " الحيوي "؟ . لكي نفهم دور ميكانيك الكم في الحسبة الرقمية، علينا أن نتساءل أولا كيف جاز لنا أن نحاول جعل شيء ***كلاسيكي*** تماماً يتصرف مثل حاسوب رقمي. ففي الفصل الخامس كنا رأينا حاسوب كرة البليارد " الكلاسيكي الذي وصفه فردكن و توفولي (ص 214)، ولكننا لاحظنا أيضاً أن هذه "الأداة " النظرية تتوقف على بعض الفروض المثالية التي تساعدنا على تجنب إحدى مشاكل عدم الاستقرار الأساسية المتأصلة في المنظومات الكلاسيكية. وكانت مشكلة عدم الاستقرار قد وصفت بأنها ***توسع فعلي*** في فضاء الطور يزداد مع تطور الزمن (ص 226 الشكل 5-14)

مؤدياً إلى ضياع متواصل في الدقة يكاد لا يمكن تجنبه، و يقع في عمل أي آلة كلاسيكية. إن ما يوقف هذا التدني في الدقة، في النهاية، هو ميكانيك الكم. إن وجود ***الحالات المتقطعة*** ضروري في الحواسيب الإلكترونية الحديثة (في ترميز الرقمين 0 و 1 مثلاً) وبهذا نعرف بصورة واضحة متى يكون الحاسوب في هذه الحالة ومت يكون في الحالة الأخرى. وهذا جوهر الطبيعة الرقمية الأساسي في عمل الحاسوب الذي يرتبط في نهاية المطاف بالميكانيك الكمومي (إذ نذكر الصفة الكمومية المتقطعة في حالات الطاقة، في التواترات الطيفية، في السبين.... ألخ، أنظر الفصل السادس). وحتى الآلات الحاسبة الميكانيكية القديمة كانت تتوقف على ***صلابة*** أجزائها المختلفة ـ والصلابة نفسها ترتكز في الحقيقة على التقطع في نظرية الكم (10).

ولكن التقطع الكمومي لا يمكن الحصول عليه من عمل U وحده. و إذا كان ثمة شيء ، فهو أن معادلة شرودنغر ***أسوأ*** من معادلات الفيزياء الكلاسيكية في تجنب التوسع غير المرغوب و" ضياع الدقة ". فدالة الموجة لجسم وحيد كان متوضعاً في البدء في الفضاء، ستنتشر تلقائياً تبعاً للإجراء U مع تطور الزمن على مناطق أوسع فأوسع (ص 302)، بل يمكن أيضاً أن نعثر أحياناً على انعدام التوضع هذا غير المعقول في منظومات أعقد من ذلك (تذكروا قطة شرودنغر!) لولا تدخل فعل R بين حين و آخر (فحالات الذرة المتقطعة على سبيل المثال، هي الحالات التي تكون فيها الطاقة محددة و كذلك الاندفاع والاندفاع الزاوي الكلي . أما الحالة العامة التي " تنتشر" ، فهي انضمام أمثال هذه الحالات المتقطعة. ولكن فعل R هو الذي يتطلب في إحدى المراحل، أن تكون الذرة فعلاً في إحدى هذه الحالات المتقطعة).

ويبدو لي أنه لا الميكانيك الكلاسيكي، ولا الميكانيك الكمومي ـ في حالته الراهنة أي من دون بعض التغيرات الأساسية الأبعد شأوا التي يمكن أن تجعل من R سيرورة حقيقية ـ يمكنه أن يفسر أبداً الطريقة التي ***نفكر فيها***. وحتى عمل الحواسيب الرقمية نفسها، قد يحتاج إلى فهم أعمق للعلاقة المتبادلة بين عملي U و R . ونحن نعرف أن هذا العمل، في الحواسيب على الأقل، يتصف ***بالخوارزمية*** (بحسب ما عنيناه منها)، ولا نحاول أن نستخدم أي سلوك ***لا خوارزمي*** افتراضي في قوانين الفيزياء . و لكن الأمر مختلف جداً ـ و أصر على ذلك ـ في الأدمغة والعقول. وهنا يمكن الدفاع عن فكرة معقولة، وهي أن هناك عنصرا أساسياً غير ***خوارزمي*** في سيرورات التفكير (الشعورية). لذلك سأحاول أن أعمل في الفصل القادم على تحديد الأسباب الداعية لاعتقادي بهذا العنصر وسأحاول أن أخمن ما هي التأثيرات الفيزيائية الهامة التي قد يمتلكها " الشعور" و التي تؤثر في عمل الدماغ .

الملاحظات

1 - في إذاعة BBC أنظر Hodges (1983) ص 419.

2 - أنجزت التجارب الأولى من هذا النوع على القطط (أنظر Myers و Sperry 1953) لمزيد من المعلومات عن تجارب الدماغ المشطور أنظر Sperry (1966) وَ Gazzaniga (1970) و Mackay (1987).

3 - أنظر Hubel (1988) ففيه وصف سهل القراءة لطريقة عمل القشرة البصرية .

4 - المصدر السابق ص 221 وقد سجلت تجارب قبل هذه خلايا حساسة لصورة اليد فحسب.

5 - كان أول عرض قوي حسن البناء للنظرية التي تقول إن الجملة العصبية تتألف من خلايا فردية منفصلة هي العصبونات، هو ذلك الذي قدمه عالم تشريح الأعصاب الكبير الاسباني كاجال Ramon Y Cajal حول العام (1900).

6 - الحقيقة أنه يمكن التوصل إلى جميع البوابات المنطقية انطلاقاً من " ~ " و " ∧ " فقط (أو حتى من عملية واحدة هي(A ∧ B)~).

7 - الحقيقة أن استخدام البوابات المنطقية ألصق ببناء الحاسوب الإلكتروني منه باعتبارات آلة تورنغ المفصلة الواردة في الفصل الثاني. أما الإلحاح في الفصل الثاني على طريقة تورنغ فكان لأسباب نظرية . و لكن تطوير الحواسيب الحالية ينبثق أكثر ما ينبثق من أعمال الرياضي البارز ج. فون نيومان John Von Neumann الأمريكي الهنغاري الأصل مثلما هي منبثقة من أعمال آلان تورنغ.

8 - إن هذه المقارنات مضللة من أوجه عديدة : فالغالبية العظمى من الترانزستورات في حواسيب أيامنا الحالية، معنية بالذاكرة بدلاً من العمل المنطقي، علماً أن ذاكرة الحاسوب يمكن دائماً زيادتها خارجياً و افتراضياً وإلى ما لانهاية له . أما بعملية موازية مضافة فإنه يمكن أن يصبح المزيد من الترانزستورات منهمكا مباشرة بالعمل المنطقي أكثر مما هو شائع حالياً.

9 - يفضل دوتش في وصفه استخدام وجهة نظر " العوالم المتعددة " في مجال نظرية الكم . ومن المهم مع ذلك أن نتحقق أن هذا الأمر لا أهمية له أبداً، لأن مفهوم الحاسوب الكمومي مناسب أيضاً أياً كانت وجهة النظر التي يتخذها المرء حيال ميكانيك الكم القياسي .

10 - إن هذا الشرح لا يمكن أن ينطبق إذا كانت المكونات " الكلاسيكية " هي اسنان cogs ومحاور axles كاملة ...إلخ. و لكن المكونات التي اعتبرها هنا مؤلفة من جسيمات عادية (أي جسيمات نقطية أو كروية).

الفصل العاشر

أين تكمن فيزياء العقل

ماالغرض من العقل؟

في دراستنا لمشكلة الرابطة عقل ـ جسم توجد مسألتان منفصلتان تستقطبان الانتباه عادة، هما: كيف يتأتى لذلك الشيء المادي (الدماغ) أن **يبعث** فينا الشعور فعلاً؟ ثم بالعكس، كيف يتأتى لهذا الشعور أن ***يؤثر*** حقيقة، بفعل إرادته، في حركة الأجسام المادية (التي تتعين في الظاهر فيزيائياً)؟....ذلكم هما الجانبان الفاعل والمنفعل في مشكلة العقل ـ الجسم، اللذان يبدو منهما وكأن لنا في عقلنا (أو بالأحرى في "شعورنا") شيئاً غير مادي يبعثه فينا العالم المادي من جهة، وهذا الشيء قادر من جهة أخرى على أن يؤثر في العالم المادي. ومع ذلك سأفضل في معالجتي التمهيدية في هذا الفصل الأخير أن أهتم بمسالة ثالثة (غير هاتين السابقتين) ربما كانت علمية أكثر منهما، ولكنها على صلة مع كلتيهما (أي مع مسألتي الفاعل والمنفعل معاً)، وذلك أملاً في أن تنقلنا محاولات البحث لها عن جواب خطوةً في الطريق نحو فهم أفضل لتلك المعضلات الفلسفية الأساسية القديمة (مشكلة العقل ـ الجسم) أما مسالتي الثالثة فهي: ***ماالميزة الاصطفائية*** التي يقدمها الشعور لأولئك الذين يملكونه فعلاً؟

إن هذا السؤال ينطوي بصيغته تلك على عدد من الفروض الضمنية، أولها أن هناك اعتقاداً بأن الشعور هو " شيء" يمكن وصفه فعلاً ***بطريقة علمية***. ثم افتراض أن هذا "الشيء" "يقوم فعلاً بعمل ما" ـ وأن ما يقوم به، علاوة على ذلك، مساعد للكائن الذي يملكه، بصورة أنه لو كان هناك كائن يساويه في كل شيء ما عدا الشعور، لكان سلوكه أقل فعالية من الأول. ولكن يمكن للمرء أن يعتقد من جهة أخرى، بأن الشعور هو مجرد مصاحب سلبي يمتلكه نظام مراقبة مجهز تجهيزاً كافياً، ولا يقوم هو نفسه في حقيقة الأمر بأي عمل (إن وجهة النظر الأخيرة هذه، هي غالباً وجهة من يدعمون الذكاء الاصطناعي القوي مثلاً). أو ربما كان هناك بدلاً من ذلك، هدف إلهي أو سرّي ترمي إليه ظاهرة الشعور ـ وقد يكون هدفاً غائياً لم ينكشف لنا بعد ــ ولكن أي مناقشة لهذه الظاهرة بلغة أفكار الاصطفاء الطبيعي وحدها ستغفل هذه الغاية كلياً.

أما بالنسبة لي كما أفكر أنا، فإني أفضل التعبير بلغة علمية عن هذا النوع من الحجج فأدعوها المبدأ الإنساني (anthropic principle)، وهو مبدأ يؤكد أن طبيعة الكون، الذي نجد أنفسنا فيه، ملزمة إلزاماً قوياً بشرط أساسي هو أن الكائنات التي تمتلك الشعور من أمثالنا يجب أن

تكون حاضرة حضوراً فعلياً لكي تشاهده (وكنا قد ألمحنا إلى هذا المبدأ باختصار في الفصل الثامن ص419، وساعود إليه فيما بعد).

وسأعرض معظم هذه القضايا في الوقت المناسب. ولكن يجب أن أشير أولاً إلى أن التعبير " عقل" ، مضلل بعض الشيء حين نرجع إلى مشكلة " العقل ـ الجسم". إذ غالباً ما يتحدث الناس، برغم كل شيء، عن "العقل اللاشعوري " . مما يثبت بأننا لا ننظر إلى التعبيرين " عقل" و " شعور" بأنهما مترادفان، وقد يكون لدينا حين نشير إلى العقل اللاشعوري صورة مبهمة لـ " شخص ما وراءنا " يقوم بدوره من خلف نشاطاتنا، ولكنه لا يترك عادة أثراً مباشراً على ما ندركه (إلاّ، ربما، في الأحلام والهلوسات والهواجس وزلات اللسان الفرويدية). بل ربما كان لدى العقل اللاشعوري وعي فعلي بذاته، ولكن وعيه هذا يظل في الحالة الطبيعية منفصلاً عن جزء العقل الذي نشير إليه عادة بعبارة " نحن ".

وقد لا يكون هذا الوعي بعيد الاحتمال نهائياً كما قد يتراءى لنا لأول وهلة، إذ ثمة تجارب يبدو أنها تشير إلى إمكانية وجود نوع من الوعي حتى حين يكون الشخص مريضاً قد خضع لعملية تحت تأثير المخدر العام ـ بمعنى أن المحادثات الجارية في أثناء العملية يمكن أن تؤثر في المريض " لا شعورياً" فيما بعد. كما يمكن تذكرها بعد ذلك أحياناً تحت التنويم المغناطيسي كما لو أنها قد جرت فيه وهو في حالة وعيه آنذاك. ثم إن الأحاسيس التي يبدو أنها كانت قد أعيقت عن الشعور بالإيحاء من المنوم المغناطيسي، يمكن تذكرها تحت تأثير نوم تال كما لو " أنه قد تمت ممارستها"، ولكنها حفظت بطريقة ما في موضع آخر مختلف (أنظر Oakley and Eames 1985). وأنا شخصياً لا تبدو لي هذه القضايا واضحة إطلاقاً، مع أني لا أتصور أنه يمكن أن يكون من الصواب إطلاق صفة " وعي" عادي على العقل اللاشعوري، كما أنه ليس لدي رغبة حقيقية في أن أتحدث عن مثل هذه التأملات هنا. وعلى الرغم من كل ذلك، فإن الحد الفاصل بين العقل الشعوري والعقل اللاشعوري هو قطعاً مسألة دقيقة ومعقدة وسنحتاج أن نعود إليها فيما بعد.

دعونا نتوخى الوضوح قدر ما نستطيع حول ما نعنيه من كلمة " شعور" وحول متى نعتقد أنه حاضر، إذ لا أظن أنه سيكون من الحكمة أن نحاول، في هذه المرحلة من فهمنا، عرض تعريف دقيق للشعور. ولكننا نستطيع الاعتماد إلى حد كبير على انطباعاتنا الذاتية وبصيرة حسنا السليم فيما يتعلق بمعنى الكلمة ومتى نرجح أن خاصة الشعور هذه حاضرة. فأنا أعرف إلى حد ما متى أكون شاعراً بنفسي، وأستدل من هذه المعرفة على أن لدى الآخرين شعوراً مناظراً لما لدي أنا. كما يبدو أنه لا بد لي لكي أشعر، من أن أشعر بشيء ما، ربما الإحساس بالألم، أو بالدفء، أو بمشهد جميل، أو بصوت موسيقي، أو ربما أكون شاعراً بإحساس مثل الحيرة، أو اليأس، أو السعادة بذكرى تجربة مضت، أو بتوصلي إلى فهم ما يقوله أحدهم، أو بفكرة جديدة من أفكاري الخاصة، أو يمكن أن أعقد النية وأنا في حالة الشعور على أن أتكلم

وأشرع في عمل آخر، كأن أنهض من مجلسي، فأستطيع كذلك أن أقفل راجعاً وأنا شاعر بهذه النوايا أو بإحساسي بالألم أو بمعاناتي من ذكرى ما أو بتوصلي إلى الفهم، أو أستطيع حتى أن أكون شاعراً بشعوري الخاص. وأستطيع أن أكون نائماً وأظل شاعراً إلى حد ما، بشرط أن أكون في حالة حلم - بل ربما أؤثّر، وأنا شاعر بذلك، في اتجاه الحلم - وهذا ما يحدث عند بداية استيقاظي. فأنا إذن على استعداد لأن أصدق بأن الشعور هو مسألة درجات وليس مجرد شيء يمكن أن يوجد أو لا يوجد. واعتبر كلمة شعور مرادفة بصورة أساسية لكلمة "وعي" (على الرغم من أن " الوعي" ربما كان أكثر سلبية بقليل مما أعنيه بكلمة " شعور") في حين أن "العقل" "والنفس" لهما معان إضافية ليس لها تعريف الآن واضح في الوقت الحاضر: ولكني آمل أن يسامحني القارئ إن أنا تركت القضايا الإضافية " للعقل" " والنفس" وشأنها. إذ إننا سنجد أنفسنا أمام ما يكفي من المشاكل عند محاولة الوصول إلى فهم الشعور كما هو.

ثم إن هناك أيضاً مشكلة " الذكاء" ، فهي في النهاية، تهم العاملين في الذكاء الاصطناعي أكثر من مشكلة الشعور (التي ربما كانت أكثر غموضاً منها). إذ ما الذي نعنيه بكلمة ذكاء؟ فألان تورنغ مثلاً في مقالته الشهيرة عام 1950 (راجع الفصل الأول ص28)، لم يستند إلى الشعور بقدر ما استند إلى التفكير، وكانت كلمة "ذكاء" عنواناً للمقال. ولكن مسألة الذكاء، بحسب نظرتي إلى الأمور، هي مسألة تابعة لمسألة الشعور، حتى أنني لا أتصور أن يأتي يوم أصدق فيه أنه يمكن للذكاء الحقيقي أن يوجد فعلاً من دون أن يرافقه الشعور. وإذا ثبت في النهاية من جهة أخرى، أن العاملين في الذكاء الاصطناعي قد تمكنوا أخيراً من محاكاة الذكاء من دون أن يوجد الشعور،فعندئذ سيكون من غير المقبول ألا يعرَّف الذكاء تعريفاً يشمل هذا الذكاء المحاكى. وفي هذه الحال لن تكون مشكلة " الذكاء" هي موضع اهتمامي الحقيقي هنا، فأنا مهتم بالدرجة الأولى بـ " الشعور ".

إني أوحي ضمناً عند تأكيدي على اعتقادي الخاص القائل إن الذكاء الحقيقي يتطلب الشعور، بأن الذكاء لا يمكن محاكاته بصورة مناسبة بوسائل خوارزمية، أي بحاسوب، هذا إذا فهمنا تعبير " حاسوب" بمعناه الذي يستخدم اليوم (لأني لا آخذ بمبدأ الذكاء الاصطناعي ***القوي*** القائل إن الشعور يتولد بمجرد وضع الخوارزمي. انظر مناقشتنا لاختبار تورنغ في الفصل الأول). لأني سأحاول أن أثبت بقوة عما قريب، بأنه لابد أن يكون هناك بالأساس عنصر ***غير خوارزمي*** في طريقة عمل الشعور (انظر بوجه خاص دراستنا للتفكير الرياضي التي سترد بعد ثلاثة مقاطع في الصفحة 488).

ثم دعونا نتوجه بالسؤال: هل ثمة طريقة عملية للتمييز بين شيء يشعر، وشيء آخر مختلف ومكافئ له ولا يشعر. وهل يكشف الشعور دائماً عن وجوده في شيء ما؟ إني أميل إلى الاعتقاد بأن الجواب عن هذا السؤال هو " نعم" . إلا أن إيماني بذلك يصعب أن يلقى التشجيع، نتيجة لانعدام الاجماع الكلي حول السؤال التالي: أين نجد الشعور في المملكة

الحيوانية؟ فبعضهم لا يقر لأي حيوان غير آدمي بأنه يملك شعوراً على الاطلاق (حتى أن بعضهم يرى أنه لم يكن موجوداً عند الكائنات البشرية قبل ما يقرب من العام 1000 ق.م. انظر Jayes 1980) في حين يريد آخرون أن يعزوا شعوراً لحشرة، أو لدودة، أو حتى لصخرة! أما أنا شخصياً، فأرى في نفسي شكاً بأن يكون للحشرة أو للدودة ـ وقطعاً لا لصخرة ــ قدر كبير من الشعور، هذا إن وجد عندها شيء منه. أما الثدييات بوجه عام، فهي تولد لديَّ انطباعاً بأن لديها بعض الوعي الحقيقي. لذلك نستدل من عدم الإجماع هذا على الأقل بأنه لا يوجد معيار عام مقبول لتجلي الشعور. إذ من الجائز أن توجد علامة السلوك الشعوري المميزة، ومع ذلك لا يوجد اعتراف شامل بها، وحتى في هذه الحالة لا يوجد سوى الدور ***الفاعل*** للشعور الذي يمكن أن يدل على وجوده. إذ يصعب أن نرى كيف يمكن أن نتحقق مباشرة وجود الوعي إذا كان وحده من غير شطره الفاعل. ويتأكد ذلك بصورة مروعة بالواقعة التالية، وهي أن عقار الكورار [x] كان قد استخدم لبعض الوقت في الأربعينيات مخدراً في العمليات الجراحية التي أجريت للأطفال ـ في حين أن تأثير هذا العقار الفعلي هو أنه كان يشل عمل الأعصاب المحركة للعضلات، مما لم يدع سبيلاً للجراح لأن يعرف آنذاك وجود ***ذلك الألم الرهيب الذي كان قد عانى منه حتماً*** هؤلاء الأطفال المنكوبين (انظر Dennelf 1978 ص 209).

دعونا نتحول إلى الدور الفاعل المحتمل الذي ***يمكن*** أن يقوم به الشعور. ترى هل القضية بالضرورة هي أن الشعور بإمكانه أن يقوم ـ وهو أحياناً يقوم فعلاً ــ بدور فاعل يمكن إبرازه عملياً؟ إن الأسباب التي تدعوني للاعتقاد بذلك متنوعة بعض الشيء: فلدينا أولاً الوسيلة التي تجعلنا نحس غالباً أننا باستخدامنا لحسنا السليم ندرك مباشرة أن شخصاً ما غيرنا ***يشعر فعلاً***، وأن من غير المرجح أبداً أن يكون هذا الانطباع مخطئاً [•]. ففي حين أنه يمكن لشخص ما أن يشعر ولا يظهر عليه ذلك واضحاً (كالأطفال المخدرين بعقار الكورار)، فإن من غير المرجح أبداً أن يظهر الشعور على شخص لا يشعر. لذلك، لابد أن توجد فعلاً طريقة في السلوك تميز الشعور (حتى وإن لم يوضحها الشعور دائماً) ونحن نتحسسها بـ " بديهة حسنا السليم".

ثانياً، لنتأمل عملية الاصطفاء الطبيعي العديمة الشفقة، ولننظر إلى هذه العملية في ضوء الحقيقة التي رأيناها في الفصل السابق، والتي تقول إن نشاط الدماغ لا يخضع كله مباشرة للشعور. فالمخيخ، مثلاً، وهو اقدم من المخ، يقوم كما يبدو ـ نظراً لكثافة عصبوناته الموضعية، الأعلى جداً من المخ ـ بأعمال معقدة جداً من دون أن يكون للشعور علاقة بها على الإطلاق.

---

[x] مادة تستخرج من بعض النباتات الاستوائية يستعملها الهنود الحمر لتسميم سهامهم وتستخدم طبياً للاسترخاء العضلي (وقد تسبب الشلل، فهي تلغي علامة الشعور الوحيدة).

[•] على الأقل بتقنية حاسبات أيامنا الحاضرة (انظر مناقشتنا لاختبار تورنغ الواردة في الفصل الأول).

ثم إن الطبيعة قد اختارت كائنات رقيقة الحس مثلنا، بدلاً من أن تظل قانعة بمخلوقات يمكنها أن تتصرف تحت إشراف آليات مراقبة لا شعورية محضة. فإذا لم يكن الشعور يخدم غرضاً اصطفائياً، فلماذا إذن تلجأ الطبيعة إلى تعقيد الأمور وتطور أدمغة ***واعية***، طالما أنه كان بإمكان أدمغة غير واعية " آلية" شبيهة بالمخيخ أن تقوم أيضاً بالعمل خير قيام؟

نضيف إلى ما تقدم أن هناك سبباً أساسياً بسيطاً لاعتقادنا أنه يجب أن يكون للشعور أثرٌ فعال، حتى ولو لم يكن هذا الأثر أحد الميزات الاصطفائية، وهو: لماذا كان على هذه الكائنات التي من أمثالنا أن تضطرب أحياناً بأسئلة حول " أنفسها" ـ وبخاصة حين يمتحنون في هذا الشأن[x] ؟ ـ (فأستطيع تقريباً أن أقول " لماذا تقرأ ***أنت*** هذا الفصل؟" أو " لماذا شعرت ***أنا أولاً برغبة قوية في أن أؤلف كتاباً في هذا الموضوع***؟". ومن الصعب أن نتخيل إنساناً آلياً عديم الشعور تماماً يبدد وقته في مسائل كهذه. ولما كانت الكائنات التي تشعر، تبدي من جهة أخرى، بين حين وآخر، نشاطاً في هذا الاتجاه المضحك الآلي، فهي لذلك تتصرف بطريقة تختلف عن الطريقة التي كانت تتصرف بها لو كانت فعلاً بلا شعور. لذلك كان للشعور أثر ما، فعال. ثم إنه لا توجد قطعاً أي مشكلة في برمجة أحد الحواسيب عن قصد، لكي يظهر تصرفه بهذه الطريقة السخيفة (فيمكن برمجته مثلاً لكي يذهب هنا وهناك وهو يتذمر " آه ياعزيزي، ما معنى هذه الحياة؟ ولماذا أنا هنا؟ ولماذا أساساً هذه النفس التي أشعر بها"). ولكن لماذا كان على الاصطفاء الطبيعي أن يزعج نفسه في تهيئة المناخ لمثل هذا التنافس بين الأفراد، في حين أن " سوق الغاب الحرة " التي لا تعرف الرحمة كان بإمكانها أن تقتلع حتماً هذه الخصلة، العديمة الجدوى والمعنى، من جذورها منذ أمد طويل!

ويبدو لي واضحاً أن الاستغراق في التأمل والتساؤل القلق الذي ننغمس فيه حين نصبح فلاسفة (ولو إلى حين) ليس من الأمور التي وقع عليها الاصطفاء لذاتها، وإنما هو " المتاع" اللازم (من وجهة نظر الاصطفاء الطبيعي) الذي يجب أن تتزود به الكائنات التي تختص بالشعور والتي وقع إختيار الاصطفاء الطبيعي على شعورها، أي وقع عليها الاختيار لسبب ما هو على الأرجح قوي جداً ويختلف كل الاختلاف. ثم أنه متاع لا ضرر فيه أيضاً، وقد ولد، كما أقدر، بسهولة نتيجة لقوى الاصطفاء الطبيعي التي لا تقهر (وإن لم يكن من دون مآسٍ). ولكن أحياناً، وربما كان ذلك حين يسعفنا الحظ نحن البشر وننعم لفترات سلام وازدهار فلا نكون فيها مضطرين دائماً لأن نصارع القوى الجوية (أو جيراننا) لكي نحافظ على حياتنا،

---

[x] ربما كان برغسون Bergson أبلغ تعبيراً عن صلة الشعور بالذكاء حين رأى أن الشعور تقتضيه الحركة لكي يستطيع المتحرك التصرف بحكمة. أما النبات فلا حاجة به إلى ذلك لأنه لا يتحرك. كما أن برغسون عبر عن أهمية الشعور الاصطفائية في كتابه الضحك وكيف نضحك من الغافل (راجع كتابيه " الطاقة الروحية" و " الضحك" ترجمة د. سامي الدروبي)

عندئذ تبدأ كنوز محتويات هذا المتاع تثير فينا الحيرة والاعجاب. وفي ذلك الحين، أي عندما ننظر إلى الآخرين يتصرفون بهذه الطريقة الفلسفية الغريبة، عندئذ تصبح لدينا القناعة بأننا نتعامل مع أفراد غيرنا، لهم فعلاً عقول مثلنا.

ترى ما الذي يفعله الشعور في حقيقة الأمر؟

دعونا نسلم بأن وجود الشعور عند أحد الكائنات هو فعلاً ميزة اصطفائية عنده، فماذا يمكن أن تكون هذه الميزة بالتحديد؟ لقد سمعت وجهة نظر تقول إن الوعي يمكن أن يكون ميزة مفيدة للخاطف حين يحاول أن يخمن ما الذي يرجح أن تفعله فريسته بعد مطاردتها " بأن يضع نفسه مكانها" . وهكذا يستطيع أن يتفوق عليها بميزته تلك أي بأنه يتخيل نفسه هو الفريسة.

يمكن جداً أن يكون في هذه الفكرة جزء من الحقيقة، ولكني لا أشعر بالراحة تجاهها أبداً، فهي في المقام الأول، تفرض مسبقاً وجود شعور عند الفريسة، إذ يصعب على الخاطف أن يستفيد من تخيل نفسه كائناً آلياً، لأن هذا الكائن ـ العديم الشعور بالتعريف ـ ليس من الأشياء التي يمكن أن يكون لها " ذات " إطلاقاً! ومهما يكن من أمر، فإني أستطيع أن أتخيل أيضاً أن خاطفاً آلياً، عديم الشعور تماماً، يمكن أن يحوي هو نفسه في جزء من برنامجه، منهاج عمل محدد هو برنامج فريسته الآلية الفعلي. لذلك يبدو لي أن ليس من الضروري منطقياً أن تكون هناك حاجة لتدخل الشعور في هذه العلاقة بين الخاطف والفريسة على الإطلاق.

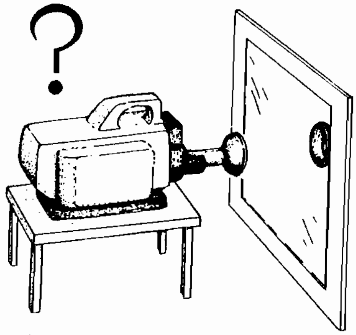
ولكن من الصعب طبعاً عندئذ أن نرى كيف استطاع الاصطفاء الطبيعي بإجراءاته العشوائية أن يصل إلى هذه الدرجة الكافية من الذكاء لكي يمنح الخاطف ***الآلي*** صورة كاملة عن برنامج الفريسة، وإلا لبدا هذا الاصطفاء أشبه ***بالتجسس*** منه بإصطفاء طبيعي[x] ! كما أنه من الصعب أن يكون في برنامج ***جزئي*** ميزة اصطفائية كبيرة للخاطف (حيث جزئي هنا تعني قطعة من شريط آلة تورنغ، أو شيئاً ما قريباً من شريط آلة تورنغ). فمن الضروري إذن، كما يبدو، إما امتلاك الشريط كله، وهذا غير مرجح، أو امتلاك جزء كامل مستقل منه على الأقل. وهكذا، وبدلاً مما سبق، يمكن أن يكون هناك جزء من الحقيقة في فكرة أن عنصراً من الشعور بدلاً من مجرد برنامج حاسوب، يمكن أن يُستدل على وجوده من اتجاه التفكير عند الخاطف ـ الفريسة. ولكن يبدو أن هذا لا يعالج مسألتنا ***الحقيقية*** حول الفرق الفعلي بين نشاط شعوري ونشاط مبرمج.

ويبدو أن الفكرة المشار إليها أعلاه تمتّ بصلة إلى وجهة نظر حول الشعور غالباً ما نسمعها تطرح، ونعني بها أن المنظومة يمكن أن تكون واعية لشيء ما إذا كان لديها نموذج عن هذا الشيء في داخلها، وأنها تصبح واعية لذاتها حين يكون لديها نموذج لذاتها في داخلها. ولكن

---

[x] ولكن ثمة حشرة تحاكي تصرف أنثى حشرة أخرى فتجتذب الذكر من هذه الأخرى وتفترسه. فما قول مؤلفنا في هذا؟

احتواء برنامج الحاسوب في الداخل (ولنقل في صورة برنامج جزئي) على وصف لبرنامج حاسوب آخر، لا يجعل البرنامج الأول واعياً للثاني، كما لايمكن لصفة " اشتمال برنامج الحاسوب لذاته" أن تكسبه وعياً لذاته. فعلى الرغم من كل التصريحات التي يبدو أنها تتكرر كثيراً، فإنه يصعب جداً في رأيي أن تتوصل ملاحظات من هذا القبيل إلى أي شيء بشأن القضايا المتعلقة بالوعي ووعي الذات. فآلة تصوير الفيديو لا تعي المشاهد التي تسجلها، كما أنها لن تعي ذاتها فيما لو وجهت إلى مرآة الشكل85 - 8).



الشكل 10-1 : حين توجه آلة تصوير فيديو إلى مرآة، تكوّن في داخلها نموذجاً لنفسها، فهل هذا يجعلها واعية لذاتها؟

والآن، أود أن أتحول إلى تتبع خط آخر، فقد رأينا سابقاً أن الوعي الشعوري[x] لا يرافق جميع الأعمال التي ينفذها الدماغ. (وأخص بالذكر أن عمل المخيخ يبدو لا شعورياً). فما هو العمل الذي نستطيع القيام به بتفكير شعوري، ولا يمكن القيام به لاشعورياً؟ إن ما يجعل المشكلة محيرة أكثرهو أن العمل، أياً كان، الذي يبدو في بادئ الأمر أننا بحاجة إلى الشعور للقيام به، يبدو أيضاً أنه يمكن تعلمه ثم ينفذ بعدئذ بطريقة لا شعورية. (وربما بالمخيخ). فالشعور بطريقة أو باخرى، مطلوب لمعالجة الأوضاع التي يجب أن نكّون فيها احكاماً جديدة، لم يسبق لنا أن أعلمنا قواعدها من قبل. ولكن من الصعب أن نكون دقيقين جداً في التمييز بين أنواع النشاط العقلي التي يبدو أنها تتطلب شعوراً وتلك التي لا تتطلب. إذ من الجائز، كما يؤكد مساندو الذكاء الاصطناعي القوي (وآخرون)، أن نطبق من جديد " عند تكوين أحكام جديدة" بعض القواعد التي استقرت تعاريفها الخوارزمية، مع أنها قواعد غامضة " عالية المستوي"، لا نعي ما الذي ساعد على تكوينها. ومع ذلك أعتقد أن نوع المصطلحات الفنية التي نميل إلى استخدامها والتي تميز نشاطنا العقلي الشعوري من ذاك اللاشعوري، ***توحي*** على الأقل بالتمييز بين ما هو لا خوارزمي وماهو خوارزمي:

[x] كنا نود أن نستعمل عبارة " الوعي الشاعر" . ولكن الخوف من الالتباس هو الذي منعنا. ومهما يكن من أمر فإن كلمة " شعور" وحدها تكفي في هذا المجال، ولكننا آثرنا التقيد إلى حد ما بتعبير المؤلف.

وحيث الشعور غير مطلوب	فحيث الشعور مطلوب
" التلقائية"	" الحس السليم"
" اتباع قواعد بغفلة عنها"	" الحكم بصحة أمر ما"
" المبرمج"	" الفهم"
" الإجراءات الخوارزمية"	" التقييم الفني"

وقد لا يكون ههذا التمييز واضحاً كل الوضوح، وبخاصة عندما تتدخل عدة عوامل لا شعورية في أحكامنا الشعورية، كالخبرة والحدس والحكم المسبق، وحتى استخدامنا العادي للمنطق. ولكني أود أن أقول إن الأحكام نفسها هي تجليات لنشاط الشعور. لذلك أرى أن أعمال الدماغ اللاشعورية هي أعمال تتم وفقاً لسيرورات خوارزمية في حين أن العمل الشعوري يختلف عن ***ذلك كل الاختلاف*** ويسير في منهج لا يمكن أن نصفه بأنه خوارزمي

وإنه لمن دواعي السخرية أن وجهات النظر التي أعرضها هنا الآن هي تقريباً معاكسة تماماً لبعض الوجهات الأخرى التي كثيراً ما سمعتها تتردد، إذ غالباً ما يحاجّون بأن العقل ***الواعي*** هو الذي يتصرف بطريقة " عقلية" يمكن للمرء أن يفهمها، في حين ان اللاشعور هو الشيء الغامض. وغالباً ما يؤكد العاملون في مجال الذكاء الاصطناعي أنه حالما يستطيع الإنسان أن يفهم خطاً من خطوط التفكير الذي يتم بطريقة شعورية، فإنه يستطيع عندئذ أن يجد الوسيلة ليجعل الحاسوب يقوم بمثلها، وأن سيرورات اللاشعور الغامضة هي التي ليس لديه (بَعدُ!) أي فكرة عن كيفية معالجتها. أما أنا فقد كان اتجاه تفكيري هو ان سيرورات اللاشعور يمكن أن تكون فعلاً خوارزمية، ولكن على مستوٍ شديد التعقيد يصعب معه إلى حد بعيد تحليلها تحليلاً تفصيلياً. أما التفكير بكامل الوعي، الذي يمكن جعله عقلياً مثل أي شيء منطقي صرف، فإنه يمكن ايضاً (وغالباً) أن يصاغ مثل أي شيء خوارزمي. ولكن هذه الصياغة ستكون عندئذ على ***مستوٍ مختلف كلياً عن سابقه***. وما عنيناه بتفكيرنا الآن ليس طريقة العمل الداخلية، كقدح العصبونات (أو إطلاقها) وما إلى ذلك، إنما معالجة الأفكار كلها. وهذه المعالجة الأخيرة، قد يكون لها طابع خوارزمي (كالمنطق القديم، أي القياسات المنطقية اليونانية كما صاغها أرسطو أو المنطق الرمزي للرياضيات، الذي وضعه ج بول George Boole، انظر Gardner 1958)، وقد لا يكون (كما هو الحال في نظرية غودل وبعض الأمثلة المعطاة في الفصل الرابع). إن ***تكوين الحكم*** الذي أنادي بأنه العلامة المميزة للشعور هو نفسه شيء ليس لدى المشتغلين بالذكاء الاصطناعي تصور عن كيفية برمجته على الحاسوب.

يعترض الناس أحياناً ***بأن موازين*** هذه الأحكام ليست في نهاية التحليل شعورية، فلمـاذا إذاً أنسب أنا هذه الأحكام إلى الشعور؟ ولكن هذا القول يعني الانحراف عـن هـدف الأفكـار الـتي أحاول التعبير عنها. فأنا لا أعني أننا نفهم عن وعي كيف نكّون انطباعاتنا وأحكامنا الشعورية، لأنه لو كان هذا هو المقصود لأدى إلى الخلط بين المسـتويات [x] الـتي كنـت أشـرت إليهـا منـذ قليل، إذ إن الأسباب الكامنة وراء انطباعاتنا الشعورية أمور غير متاحة مباشـرة للشـعور. فهـذه الأسباب يجب أن نعتبرها واقعة في مستو فيزيائي أعمق من مستوي الأفكار الراهنة الـتي نعيهـا. (وسأقدم فيما بعد محاولة [في هذا الشأن] بصورة اقتراح). بل إن ما عنيتـه هـو أن الانطباعـات الشعورية نفسها هي الأحكام (غير الخوارزمية).

وفي الفصول الأولى، كانت هذه النقطة بالفعل هي إحدى المسائل الكامنة خلف السـطور، وهي أن في تفكيرنا الشعوري شيئاً ***غير خوارزمي***. وأخـص بـالذكر أن إحـدى النتـائج المترتبـة على الإثبات المقدم في الفصل الرابع، ولا سيما ذاك المتعلق بنظرية غودل، كان ذاك القائل ـ في الرياضيات على الأقل ـ إن التامل الشعوري يمكن أن يجعلنا قـادرين أحيانـاً علـى تـأكيد صحـة قضية من القضايا بطريقة لا وجود لخوارزمية تستطيع القيام بها [†]. (وسأشبع هذه الحجة دراسة بعد برهة). بالفعل إن الخوارزميات بحد ذاتها لا تؤكد أي حقيقة أبداً! إذ من السـهل أن نجعـل الخوارزميات تنتج لا شيء سوى الكذب مثلما هو سهل أن نجعلها تنتج حقائق. والمـرء بحاجـة إلى ***تبصر خارجي*** لكي يقرر صلاحية خوارزمية أو عدم صلاحيتها (وسنفصّل ذلك أكـثر فيمـا بعد). فالحجة التي أعرضها هنا هي أن تلك الموهبة التي تمكننا من أن نحـزر (أو نحـدس) الحقيقـة انطلاقاً من اكتشاف الخطأ (أو الجمال من القباحة!) في الشروط المناسـبة، مـا هـي إلا العلامـة المميزة للشعور.

ولكن يجب أن أوضـح بـأنني لا أعـني بهـذا الحـدس شـكلاً مـن أشـكال التنبـؤ السـحري. فالشعور ليس له معين على الإطلاق حين يحاول أن يخمن الرقم السـعيد عنـد " دوران دواليـب اليانصيب" [فهذا يتوقف على المصادفة وحدها]! بـل إن مـا قصـدت إليـه هـو الأحكـام الـتي يطلقها المرء باستمرار حين يكون في حالة شعورية تجمـع بـين الوقـائع كلهـا، مـع الانطباعـات الحسية، مع ما يذكره من التجارب ذات العلاقة، وموازنة الأمور بعضها مع بعض ـ بل وتكوين الأحكام المستلهمة في بعض الأحيان. فالبيانات الكافية متاحة مبدئياً لتكويـن الحكـم المناسـب، غير أن عملية تكوين الحكم المناسب باستخلاص ما يلزم من البيانات المتشابكة، هي عمليـة قـد لا توجد لها طريقة خوارزمية واضحة ـ أو حتى لو وجدت طريقـة كهـذه، فإنهـا قـد لا تكـون

---

[x] يقصد مستويات، الشعور والوعي

[†] راجع المقطع الذي عنوانه " كيف نتفوق على خوارزمية". وكذلك القضايا الغودلية.

صالحة للتطبيق. ولكن قد تلزمنا، بمجرد اتخاذ الحكم في موقف ما أمامنا، طريقة خوارزمية لفحص دقة الحكم (أو ربما طريقة أسهل فحسب) أكثر مما تلزمنا لتكوين الحكم نفسه في الدرجة الأولى. وفي ظني أن الشعور يمكن أن يلجأ في مثل هذه الظروف إلى الانطواء على ذاته كوسيلة لاستلهام الأحكام المناسبة.

ولكن لماذا أقول بأن علامة الشعور المميزة هي إصدار أحكام لا خوارزمية؟ إن ذلك ناشئ، في جانب منه، من تجاربي في كوني رياضياً. فأنا ببساطة لا أثق بأفعالي الخوارزمية اللاشعورية عندما لا يعيرها وعيي الانتباه الكافي. إذ لا يوجد غالباً أي شيء خطأ في الخوارزمية بحد ذاتها، أو في الحسابات التي تجري. ولكن هل هذه هي الخوارزمية الصحيحة التي تناسب المسألة التي بين أيدينا؟ ولنأخذ مثالاً بسيطاً، فقد تعلمنا كلنا القواعد الخوارزمية لضرب عددين أو لتقسيم عدد على آخر (أو ربما فضَّل أحدنا أن يستعين بآلة جيب حاسبة خوارزمية). ولكن كيف يعرف ما الذي يجب عمله للمسألة المعروضة، هل يضرب الأعداد أم يقسمها؟ فهو لذلك يحتاج إلى التفكير والوصول إلى **حكم شعوري** (وسنرى عما قريب لماذا يجب أن تكون مثل هذه الأحكام لا خوارزمية، في بعض الأحيان على الأقل!) ولكن قرار ضرب الأعداد أو تقسيمها يمكن أن يصبح طبعاً، بعد حل الكثير من المسائل المتشابهة، طبيعة ثانية عند الإنسان، ويُنفَّذ بطريقة خوارزمية ـ وربما بالمخيخ. ولن يظل الوعي ضرورياً لهذه المرحلة أكثر من ذلك، فيتحرر منها سامحاً لعقل الشخص الشعوري بأن يُعجب ويتأمل في أمور أخرى ـ وإن كان المرء بحاجة من حين إلى آخر لأن يقوم بمراقبة هذه الخوارزمية لئلا تكون قد انحرفت بطريقة ما (ربما كانت خادعة).

وما يحدث للعمليات البسيطة التي بيّناها يحدث دائماً في جميع مستويات التفكير الرياضي. فالمرء غالباً ما يسعى للخوارزميات عندما يمارس الرياضيات، ولكن سعيه نفسه لا يبدو أن من الممكن أن يصبح منهجاً خوارزمياً. ولكن حين نجد الخوارزمية المناسبة، تكون المسألة قد حلت إلى حد ما. ثم إن الحكم الرياضي بأن خوارزمية ما هي فعلاً مضبوطة أومناسبة، هو نوع الأمور التي تتطلب كثيراً من اليقظة الواعية. وقد ورد معنا شيء مماثل لذلك عندما ناقشنا أنظمة صورية مخصصة للرياضيات كنا وصفناها في الفصل الرابع. إذ يمكن للمرء أن يبدأ من بعض البديهيات ليستنتج منها بعدئذ دعاوي رياضية مختلفة. فالإجراء الأخير يمكن فعلاً أن يكون خوارزمياً، ولكن ثمة أحكام تحتاج إلى رياضي واع كي يقوم بها وكي يقرر أي البديهيات هي المناسبة. أما لماذا كان من الضروري أن تكون هذه الأحكام لا خوارزمية فلابد أنه سيصبح أوضح بعد ذلك في مناقشتنا التي ستأتي في المقطع بعد الآتي. ولكن قبل أن نصل

إلى هذه المناقشة، دعونا نرى وجهة نظر قد تكون أكثر أهمية، مثل: لأجل ماذا تعمل أدمغتنا، وكيف ظهرت إلى الوجود؟

أهو إصطفاء طبيعي للخوارزميات؟

الحقيقة أنه إذا ما افترضنا أن نشاط دماغ الإنسان ـ الواعي أو غير الواعي ـ مقصور على القيام بأعمال نوع من الخوارزمية المعقدة، فعندئذ لابد لنا من أن نتساءل كيف ظهرت فعلاً هذه الخوارزمية الخارقة الفعالية إلى الوجود. والجواب القياسي طبعاً، "بالاصطفاء الطبيعي"إذ لابد أن المخلوقات ذوات الأدمغة المتطورة التي تمتلك الخوارزميات الأكثر فعالية هي التي كانت لها عند التطور الحظ الأوفر للبقاء، فهي التي صار لها بالإجمال ذرية أكثر. وهذه الذرية بدورها أقرب لأن تحمل خوارزميات أكثر فعالية من أبناء عمومتها، لأنها ورثت مقومات هذه الخوارزميات الأفضل من آبائها. وهكذا تحسنت هذه الخوارزميات بالتدريج ــ ولكن ليس بالضروري بثبات، لأن من الجائز أنها مرت بفترات انقطاع كثيرة في أثناء تطورها ــ واستمر حالها هذا إلى أن وصلت إلى وضعها الرائع الذي نجده (ربما في الظاهر) في دماغ الإنسان (قارن 1986 Dawkins).

وحتى بحسب وجهة نظري الخاصة، لابد أن يكون في هذه الصورة شيء من الحقيقة، لأنـي أرى أن الكثير من نشاط الدماغ هو فعلاً خوارزمية. بل إني ـ كما قد يكون القارئ قد استدل من المناقشة السابقة ـ شديد الإيمان بقوة الاصطفاء الطبيعي. غير أني لا أرى كيف يمكن للاصطفاء الطبيعي أن يطوّر بنفسه خوارزميات يمكن أن تتوصل إلى أحكام شعورية هي من النوع الذي يحكم ***على سلامة*** خوارزميات أخرى يبدو أننا نملكها.

دعونا نتخيل برنامج حاسوب عادي. ترى كيف أمكن له أن ينشأ؟ من الواضح أنه لم ينشأ (مباشرة) بالاصطفاء الطبيعي، ولا بد أن بعض مصممي برامج الحواسيب كانوا قد فكروا فيه وتحققوا أنه ينفذ تنفيذاً صحيحاً الأعمال التي صنع لأجلها. (في الحقيقة، إن معظم البرامج المعقدة للحواسيب تحوي أخطاء ـ وهي عادة ثانوية، ولكنها ماكرة ولاتظهر إلا في ظروف غير عادية، ووجودها لا يؤثر تأثيراً ملموساً في حجتي). وأحياناً يمكن أن يكون برنامج الحاسوب نفسه قد "كتبه" برنامج آخر يسمى البرنامج الحاسوبي "الأم"، ولكن لا بد أن يكون هذا البرنامج الأم نفسه قد أبدعته عبقرية إنسان وبصيرته. أو يمكن أن يكون البرنامج قد جمع أيضاً بعضه مع بعض من مقدمات كان بعضها من انتاج برامج حاسوبية أخرى. ولكن صلاحية البرنامج ومفهومه الجوهري نفسه لابد أنه كان في النهاية من مسؤولية شعور إنسان واحد (على الأقل).

من الطبيعي أن بإمكان المرء أن يتصور أنه لم تكن ثمة حاجة لذلك، وأنه كان بإمكان البرامج الحاسوبية، إذا ما اعطيت الوقت الكافي، أن تتطور تلقائياً بطريقة ما بسيرورة إصطفاء

طبيعي. فإذا كان أحدنا يؤمن بأن أعمال الشعور عند واضعي البرامج الحاسوبية، هي نفسها مجرد خوارزميات، فلا بد له عندئذ من أن يؤمن بأن هذه الخوارزميات كانت قد تطورت بهذه الطريقة بحذافيرها. غير أن في ذلك نقطة تحيرنا، وهي أن اتخاذ قرار بصلاحية خوارزمية ما هي نفسها ليست سيرورة خوارزمية.وقد سبق لنا أن رأينا شيئاً من هذا القبيل في الفصل الثاني. (لأن السؤال: هل ستتوقف آلة تورنغ فعلاً أم لا، ليس بالسؤال الذي يمكن أن تتقرر الإجابة عنه خوارزمياً). إذ يحتاج المرء إلى ***البصيرة***، لا إلى مجرد خوارزمية أخرى كي تقرر هل ستقوم هذه الخوارزمية أو تلك بعملها.

ومع ذلك لا يزال بإمكان المرء أن يتخيل نوعاً من سيرورة الاصطفاء الطبيعي يمكنها أن تنتج خوارزميات صالحة ***تقريباً*** . بيد أني شخصياً أجد صعوبة كبيرة في تصديق ذلك. لأن أي سيرورة اصطفائية من هذا القبيل، لا يمكنها أن تؤثر إلا في مخرجات الخوارزميات*، وليس مباشرة في الأفكار الكامنة خلف طريقة عمل الخوارزميات. فسيرورة الاصطفاء الطبيعي هنا ليست عقبة إلى أبعد الحدود فحسب، بل إني أؤمن بأن ليس لها عمل هنا أبداً. ففي الدرجة الأولى، ليس من السهل أن تتحقق بمجرد فحص مخرجات الخوارزمية ماهي هذه الخوارزمية فعلاً. لأن من السهل أن نبني آلتيْ تورنغ بسيطتين تختلف طريقتا عملهما كلياً، ولا يختلف شريطا مخرجاتهما قبل الموضع الذي رقمه 265536 مثلاً- وهذا الفرق لايمكن أن يُعثر عليه أبداً في تاريخ الكون بأكمله!). أضف إلى ذلك أن أبسط "تبدل" في خوارزمية ما (وليكن تغيراً طفيفاً في مواصفات آلة تورنغ أو في شريط مدخلاتها) قد يجعل هذه الخوارزمية عديمة الفائدة كلياً. فمن الصعب أن نرى كيف يمكن ان تطرأ ***تحسينات*** فعلية على الخوارزميات بهذه الطريقة العشوائية. (حتى أن التحسينات ***المتعمدة*** متعذرة من دون أن يكون لها معان ميسرة يستفاد منها). ويؤيد قولنا هذا عدم ندرة الظروف التي احتاج فيها برنامج معقد للحاسوب إلى التصحيح أو التبديل، (لأنه كان موثقاً بطريقة غير كافية)، وكان مبرمجه الأصلي قد رحل أو مات. ففي هذه الحالة، قد يكون أسهل كثيراً مسح البرنامج الأول وبدء كل شيء من جديد، بدلاً من أن نحاول فك الألغاز والبحث عن مختلف المعاني والنوايا الدفينة التي يقوم عليها هذا البرنامج).

من الجائز أن تُبتكر طريقة ما "أقوى" في تحديد مواصفات الخوارزميات لا تكون عرضة للانتقادات السابقة. وهذا بطريقة ما، ما أقوله أنا نفسي. والمواصفات "القوية" هي ***الأفكار*** التي تقوم عليها الخوارزميات. غير أن الأفكار كما نعرف هي أشياء تحتاج، لكي تتجلى، إلى عقول تشعر [أو تعي]، وهكذا عدنا إلى مشكلتنا وهي ما هو الشعور فعلاً، ومالشيء الذي يستطيع

---

* ثمة أيضاً مسألة معقدة هنا، هي هل سننظر إلى خوارزميتين بانهما متكافئتان لمجرد أن مخرجاتهما هي نفسها، وليس لأن حساباتهما الفعلية هي نفسها (انظر الفصل الثاني ص84)

عمله ولا تستطيع عمله الأشياء اللاشعورية ـ وكيف كان الاصطفاء الطبيعي ذكياً في الأصل إلى تلك الدرجة الكافية لأن يطور تلك المزايا الفائقة الروعة؟

لقد توصل الاصطفاء الطبيعي إلى نتائج مذهلة فعلاً. وما حصلته بنفسي من معارف قليلة عن كيفية عمل دماغ الإنسان ـ وحتى عند أي كائن حي آخر ـ جعلني أصعق من الرعب والعجب. فطريقة عمل العصبون الفردي تفوق الوصف، هذا فيما عدا أن العصبونات نفسها منظمة معاً بطريقة رائعة جداً، إضافة إلى ذلك العدد الهائل من الارتباطات الموصولة منذ الولادة والمهيأة لجميع المهمات التي سيحتاجها الكائن فيما بعد. ولا تقتصر الروعة على الشعور نفسه فحسب، بل إننا نجدها في جميع الوسائل التي يبدو أنه يحتاجها في دوام عمله!

ولو أتيح لنا يوماً ما أن نكشف بالتفصيل ما هي الخاصة التي تؤهل شيئاً فيزيائياً لأن يصبح مالكاً للشعور، لأمكننا أن نصبح عندئذٍ قادرين عن وعي على بناء هذه الأشياء لأنفسنا ـ على الرغم من أنها يمكن ألا تنعت عندئذ بكلمة "آلات" بالمعنى الذي نعنيه حالياً من الكلمة. ويمكن للمرء أن يتصور أن لهذه الأشياء امتيازاً هائلاً علينا، لأنها قد تكون استهدفت ***خصيصاً*** للمهمة التي تقوم بها، أي ***لإنجاز الشعور***. وقد لا يكون لزاماً أن تنمو من خلية واحدة. كما قد لا يكون لزاماً أن تحتفظ "بتراث" أجدادها (كالجوانب القديمة "العديمة الفائدة" من الدماغ أو الجسم، التي لا تزال تعيش فينا، لا لسبب لا لأنها من "أعراض" أسلافنا البعيدين). كما يمكن للمرء أن يتصور أن هذه الأشياء يمكن، بحكم هذه الامتيازات، أن تعقب الكائنات البشرية بحلولها ***فعلاً*** محلها، في حين أن الحواسيب الخوارزمية (في اعتقاد من هم من أمثالي) محكوم عليها بالتبعية.

ولكن قد تكون هناك أيضاً أمور أكثر من هذه في مسألة الشعور. فلربما كان شعورنا متعلقاً بطريقة ما بإرثنا وبآلاف ملايين السنين من التطور الفعلي التي خلفناها وراءنا. إذ يتجه تفكيري إلى أنه لا تزال هناك أمور غامضة تحيط بالتطور، وبخاصة "سعيه الظاهري المتخبط" نحو غرض مستقبلي معين. إنها على الأقل أمور يبدو أنها تنظم نفسها بطريقة أفضل إلى حد ما مما يتوقع لها أن تكون عليه فيما لو بنيت بالاعتماد فحسب على تطور عشوائي أعمى واصطفاء طبيعي لا غير. فمن الجائز فعلاً أن تكون مثل هذه المظاهر [العشوائية] هي مجرد خداع. إذ يبدو أن هناك شيئاً يتعلق بالطريقة التي تعمل بها قوانين الفيزياء، وهذا الشيء هو الذي يتيح للاصطفاء الطبيعي أن يكون عملية أكثر فعالية مما لو كان يتم بمجرد قوانين المصادفة. فما يبدو في النتيجة أنه "تلمس ذكي" هو مسألة مهمة سأعود إليها بعد فترة وجيزة*.

---

* ألا يحتمل أن يكون الشعور هو الذي ثبت في الاصطفاء الطبيعي ليقوم بعملية الاختيار بدلاً من أن يتم عن طريق المحاولة والخطأ وبقاء الأصلح،أليست معايير الجمال (ثم الأخلاق) هي نتيجة الشعور؟

طبيعة البصيرة الرياضية اللاخوارزمية

إن قسماً كبيراً من سبب إيماننا بأن الشعور قادر على التأثير في الحكم بطريقة لا خوارزمية، يرجع، كما ذكرت في السابق، إلى اعتبارات من نظرية غودل. إذ إننا إذا استطعنا أن نرى أن دور الشعور عند تكوين الأحكام الرياضية (التي يؤلف الحساب والبرهان المتين عاملين مهمين فيها) هو دور لاخوارزمي، فعندئذ، يمكننا أن نقتنع حتماً بأن هذا المقوم اللاخوارزمي يمكن أن يكون حاسماً كذلك في الدور الذي يقوم به الشعور في ظروف أعم (أي لاصلة لها بالرياضيات).

ولأجل ذلك دعونا نتذكر الحجج المعطاة في الفصل الرابع التي تؤكد نظرية غودل وعلاقتها بقابلية الحساب Computability. فقد أثبتنا هناك أنه مهما تكن الخوارزمية (الكافية الشمولية) التي يستطيع الرياضي* أن يستعملها لإثبات حقيقة رياضية ـ أو بصورة أخرى مكافئة: مهما يكن النظام الصوري الذي يستطيع الرياضي أن يتبناه ليوفر له معياراً للحقيقة ــ سيكون هناك دائماً دعاوي رياضية كدعوى غودل الصريحة $P_k(k)$ (انظر ص 143) في هذا النظام الذي لايمكن لخوارزميته أن تقدم جواباً لها. فلو كانت الأعمال في عقل الرياضي خوارزمية محضة، لما أمكن للخوارزمية (أو للنظام الصوري) الذي يستخدمه فعلاً في تكوين أحكامه، أن يعالج الدعوى $P_k(k)$ المبنية من خوارزميته الشخصية. وعلى رغم ذلك، نستطيع أن نرى (من حيث المبدأ) أن $P_k(k)$ صحيحة فعلاً! الأمر الذي قد يبدو للرياضي أنه أمام تناقض، مادام يفترض فيه أنه قادر على رؤية هذا التناقض أيضاً. وهذا ما قد يدلنا على أن الرياضي لم يكن يستعمل خوارزمية على الإطلاق!

وتلك في الأساس هي الحجة التي قد قدمها لوكاس (1961) Lucas على أنه لا يمكن لنشاط الدماغ أن يكون خوارزمياً بصورة كاملة. ولكن قُدمت من حين لآخر، حجج مضادة (راجع Benacerraf 1967، Good1969، Lewis1969، Hofstader 1981، Bowie 1982). وعليَّ أن أذكر هنا أمراً يرتبط بهذه المناقشة، وهو أن المصطلح "خوارزمية" (بدلالتيه، الصفة والاسم، اللتين استعملتا في هذا الكتاب) يعني كل ما يمكن محاكاته (فعلاً) بواسطة حاسوب عادي (general - purpose) ويتضمن ذلك (أي هذه المحاكاة) حتماً "النشاط التفرعي"، بل وكذلك "شبكات العصبونات" (أو :الآلات ذات الروابط")، و"كل مايساعد على الاكتشاف"، والتعلم (حيث يحدد دائماً وسلفاً نهجاً حول الطريقة التي يفترض أن الجهاز يتعلم بها)، كما يتضمن أخيراً تبادل التأثير مع الوسط (وهذا ما يمكن محاكاته بشريط المدخلات في آلة تورنغ. ولكن أكثر هذه الحجج المضادة جدية هي التالية: لابد لنا، لكي نقنع أنفسنا حقيقة

---

* الرياضي أو الرياضية، لا فرق. انظر الحاشية في الصفحة 29.

بصحة P_k (k)، من معرفة ما هي خوارزمية الرياضي فعلاً، ومن التأكد بأنها تصلح أن تكون وسيلة للوصول إلى الحقيقة الرياضية. وإذا كان الرياضي يستخدم في رأسه، كما سيلاحظ مؤيدو الذكاء الاصطناعي القوي بسرعة، خوارزمية معقدة جداً، فلن يكون لدينا عندئذ حظ في معرفة ما هي هذه الخوارزمية، ولن نكون إذن قادرين فعلاً على بناء دعوى غودل في هذه الخوارزمية، ناهيك من أن نكون مقتنعين بصحتها. ولكن هذا الاعتراض، الذي كثيراً ما يجابهون به التصاريح التي من قبيل ذاك الذي قلته هنا ورأيت فيه أن نظرية غودل تشير إلى أن أحكام الإنسان الرياضية هي لاخوارزمية (1)، هو اعتراض لا أجده أنا نفسي مقنعاً. ولبرهان ذلك دعونا نفترض حالياً، ولبرهة وجيزة، أن الطرق التي يكوِّن بها الناس الرياضيون أحكامهم الشعورية في الحقائق الرياضية، هي بالفعل خوارزمية. وسنحاول اعتماداً على هذا الفرض تحويل هذه الأحكام بواسطة نظرية غودل إلى اللامعقولية (وذلك بطريقة الرد إلى استحالة).

يجب أن نلاحظ أولاً أنه من الممكن أن يستخدم رياضيون مختلفون خوارزميات غير متكافئة لكي يقرروا حقيقة ما. وفي جميع الأحوال نجد أن إحدى مزايا الرياضيات الأكثر إدهاشاً (والتي ربما كانت الرياضيات فريدة فيها بين نظم المعرفة)، هي أن حقيقة الدعاوي، يمكن إثباتها ببرهان مجرد! والبرهان الرياضي الذي يقنع أحد الرياضيين، سيقنع ـ ما لم يحوِ خطأ ما ـ أيَّ رياضي آخر حالما يكون البرهان قد اكتمل فهمه. ويسري ذلك أيضاً على نمط غودل في الدعاوي. فإذا كان ثمة نظام صوري معين، وكان الرياضي الأول مستعداً للتسليم بأن جميع بديهيات هذا النظام وقواعد منهجه لا تؤدي إلا إلى دعاوٍ صحيحة، فعندئذ لابد أن يكون مستعداً أيضاً للتسليم بأن الدعوى "الغودلية" [x] في هذا النظام تصف دعوى صحيحة. كما لابد أن نجد هذا التسليم نفسه بالضبط عند رياضي ثان. فالنقطة الجوهرية هي أن البراهين التي تثبت حقيقة رياضية هي ***أمر يمكن تداوله*** (2) [أي أنه سار ومقبول لدى الجميع].

ولذلك لسنا بحاجة لأن نتحدث عن مختلف الخوارزميات الغامضة التي قد يصادف أن تجول في رؤوس بعض الرياضيين، بل نتحدث عن نظام صوري، هو وحده المستعمل بوجه عام، ومكافئ لجميع خوارزميات الرياضيين المختلفة عند الحكم على حقيقة رياضية. وعلى هذا، لايمكن أبداً لهذا النظام "العام" الافتراضي، أو الخوارزمي، أن يشتهر بأنه النظام الذي نستخدمه في تقرير حقيقة معينة! إذ لو كان الأمر كذلك لأمكن عندئذ تكوين دعواه الغودلية، ومعرفة أنها يمكن أن تكون حقيقة رياضية أيضاً. ولذا لا بد لنا من أن نستنتج بأن الخوارزمية التي يستخدمها الرياضي فعلاً في إقرار حقيقة رياضية هي خوارزمية معقدة أو غامضة إلى درجة أننا لن نستطيع أبداً معرفة حقيقة صلاحيتها.

---

[x] نسبة إلى المنطقي "غودل"

ولكن هذا القول ينسف طبيعة الرياضيات من أساسها (إذ إن النقطة الجوهرية في كل ميراثنا من الرياضيات، ومن تدريبنا، هي أن لا نذعن لسلطة بعض القواعد الغامضة التي لا أمل لنا أبداً في فهمها. بل يجب أن نرى ـ مبدئياً على الأقل ـ أن كل خطوة في برهاننا يمكن تحويلها إلى شيء بسيط وواضح. لأن الحقيقة الرياضية ليست عقيدة (موروثة متصلبة) ومعقدة تعقيداً فظيعاً تسمو شرعيته (أو صلاحيته) فوق أفهامنا، بل هي أشياء مبنية من مقومات بسيطة وواضحة ـ وحين نفهمها تصبح حقيقتها واضحة ومصدقة لدى الجميع.

وهذا البرهان، في اعتقادي، الذي هو برهان سمج على قدر ما نأمل من برهان بطريقة نقض الفرض (أو الرد إلى استحالة) ، يفتقر إلى البرهان الرياضي الفعلي! ولكن لابد أن تكون الرسالة واضحة. فالحقيقة الرياضية ليست شيئاً يمكن أن نؤكده بمجرد استخدامنا لخوارزمية. فأنا اعتقد أيضاً أن شعورنا هو مقوم حاسم في فهمنا للحقيقة الرياضية. إذ يجب أن "نرى" الحقيقة في البرهان الرياضي وأن نكون مقتنعين بصلاحيتها. فهذه "الرؤية" هي جوهر شعورنا الأساسي. وهي ما يجب أن يكون موجوداً أنّى أدركنا حقيقة رياضية. وعندما نقنع أنفسنا بصلاحية نظرية غودل، لا "نبصر" هذه الصلاحية فحسب، بل نكشف بعملنا هذا الطبيعة اللاخوارزمية الحقيقية في سيرورة "البصيرة" نفسها.

الإلهام والبصيرة والأصالة

لابد لي من محاولة إعطاء قليل من الشروح حول ومضات البصيرة تلك، التي تنفرج عرضاً عن رؤية جديدة نسميها إلهاماً. فهل هذه أيضاً هي (بأي معنى من المعاني الوجيهة) من نتاج الشعور نفسه أم أنها [في الحقيقة] أفكار وصور تصدر بصورة غامضة عن العقل اللاشعوري؟ إن المرء ليستطيع أن يأتي بأمثلة عديدة كان قد سجل فيها مفكرون كبار مثل هذه التجارب. أما أنا شخصياً فسأحصر إهتمامي. لكوني رياضياً، بالتفكير الأصيل الملهم عند بعض من الرياضيين، ولكني أتصور أن هناك الكثير مماهو مشترك بين الرياضيات والعلوم الأخرى والفنون. أما من يود رواية دقيقة وجميلة جداً فنحيله إلى الكتاب الصغير [The Psychology of Inventien in the Mathematical Field بسيكولوجيه الإبداع في مجال الرياضيات]، فهو كتاب كلاسيكي ألفه الرياضي الفرنسي اللامع جداً ج.هادامار Jacques Hadmard. ويروي فيه تجارب عديدة عن الإلهام كما وصفها رياضيون أفذاذ وأشخاص آخرون. وكان من أشهر هذه التجارب، تلك التي رواها هـ. بوانكاريه Henri Poincaré، ويصف فيها في البدء كيف مر بفترات من التفكير المركز الشديد، والجهود الواعية، وهو يبحث فيما دعاه الدوال الفوخية Fuchsian، ولكنه توصل إلى مأزق، وعندئذ ...(وهنا سنتابع رواية بوانكاريه نفسه):

......غادرت "كان" Caen التي كنت أقيم فيها لأذهب في رحلة جيولوجية تحت إشراف مدرسة المناجم. وقد حملتني عوارض السير على نسيان عملي الرياضي. وحين وصلنا كوتانس Coutances [x]. ركبنا في حافلة لكي نذهب إلى مكان أو آخر. وفي اللحظة التي وضعت فيها قدمي على درجة الحافلة (لكي أصعد)، عرضت الفكرة في خاطري. و لم يكن في أفكاري السابقة أي شيء ينبئ بأنه مهد الطريق إليها. وكانت تلك الفكرة هي أن التحويلات التي استخدمتها لتعريف الدوال الفوخية هي نفسها تحويلات الهندسة اللاإقليدية. و لم أتحقق الفكرة، إذ لم يتسن لي الوقت، فقد أخذت مكاني في الحافلة، وتابعت حديثاً قد بدأ سابقاً. ولكني كنت أشعر بثقة تامة. ولدى عودتي إلى "كان " بقصد الراحة، تحققت النتيجة في وقت فراغي.

إن ما يدهشنا في هذا المثال (وفي الكثير غيره مما أورده هادامار) هو أن تلك الفكرة العميقة المعقدة، قد أومضت ظاهرياً في ذهن بوانكاريه حين كانت أفكاره الواعية في اتجاه آخر مختلف تماماً وأنها كانت مصحوبة بشعور الثقة بأنها كانت صحيحة ـ كما أثبت الحساب الذي أجري بعد ذلك بالفعل. وهنا لا بد من التأكيد أن الفكرة نفسها لم تكن أبداً شيئاً يسهل شرحه في كلمات. بل أتخيل كما لو أنها كانت تحتاج من بوانكاريه إلى ما يشبه حلقة دراسية لمدة ساعة من الزمن لكي تصل خلالها فئة من الخبراء إلى وضع الفكرة بالشكل المناسب. ولقد كان السبب الوحيد لدخولها في وعي بوانكاريه وهي كاملة التكوين، هو بطبيعة الحال أنها كانت قبل ذلك موضع نشاط واع مدروس لمدة ساعات طويلة، جعلته يتآلف مع جوانب المسألة العديدة المختلفة التي كانت موضع بحثه. ومع ذلك، فإن الفكرة التي خطرت لبوانكاريه وهو يصعد إلى الحافلة كانت من بعض النواحي فكرة "وحيدة" أمكنه فهمها كاملة في لحظة واحدة! بل إن الأروع من ذلك كله قناعة بوانكاريه بصحة الفكرة، حتى أن التحقق المفصل الذي أتى بعد ذلك بدا تقريباً زيادة لا مبرر لها.

ربما كان عليَّ أن أربط ذلك بتجارب مرت بي شخصياً شبيهة بطريقة ما بالسابقة. ولكني لا أستطيع أن أذكر في حقيقة الأمر أي مناسبة واتتني فيها فكرة كاملة على نحو غير متوقع. أي كما يبدو أنه قد حدث مع بوانكاريه في ذلك المثال (أو مع أي رياضي آخر سجل أمثلة عن الإلهام الصادق). فأنا شخصياً يبدو أنه لابد لي من أن أفكر في المسألة التي في متناولي (وربما تفكيراً غامضاً) بوعي، ولكنه ربما كان وعياً في مستو متدن من الشعور يقع بالتحديد في مؤخرة عقلي. ومن الجائز أيضاً أن أكون عندئذ منشغلاً في نشاط آخر أدعى للإسترخاء، كحلاقة اللحية مثلاً، وهو مثال جيد. ومن الجائز أنه لابد لي من أن أكون قد بدأت التفكير في مسألة كنت قد تركتها جانباً لبرهة من الزمن، لأن الساعات الصعبة العديدة التي نقضيها في نشاط التفكير المركز الواعي، هي ساعات لابد أنها ضرورية قطعاً. كما أني في بعض الأحيان أحتاج

---

[x] مدينة صغيرة فرنسية على المانش

إلى فترة من الزمن لكي أطلع أنا نفسي من جديد على المسألة. ولكن تجربة الفكـرة الـتي تلتمـع "كالبرق" في مثل هذه الظروف، ليست شيئاً غريباً عني مع كل ما يرافقهـا مـن شـعور القناعـة القوي بصحتها.

وهذا أمر قد يستحق منا إيراد مثال خاص به سنجد فيه نقطة إضافية طريفة مثيرة للاهتمام، ففي خريف عام 1964، كنت مهتماً بمسألة شذوذيات الثقب الأسود. وكان أوبنهايمر وسنايدر قد أثبتا في عام 1939 أنه يمكن أن يؤدي انهيار النجم الكبير الكتلة، ***انهياراً كروياً*** بكـل معنـى الكلمـة، إلى فضـاء مركـزي ــ أي إلى شـذوذية زمنيـة ــ تتوسـع فيهـا نظريـة النسـبية العامـة الكلاسيكية إلى ماوراء حدودها (انظر الفصل السابع ص 398،394). وقد شعر أناس عديدون أنه يمكن الخلاص من هذه النهاية غير السارة، فيما لو حذف فرضهم (غير المعقول) عن التنـاظر الكروي التام.ففي الحالة الكروية تتجة المادة المنهارة كلها إلى نقطة مركزية واحدة تظهر فيها، بسبب هذا التناظر وربما من دون أن يكون ذلك متوقعاً، شذوذية كثافتها لا نهائية. ولكـن بـدا أنه ليس امرأ غير معقول أن نفترض أن المادة يمكن أن تصل، من غـير هـذا التنـاظر، إلى المنطقـة المركزية بطريقة أكثر تشويشاً كما لن تظهر هناك شذوذية كثافتها لا نهائية. بـل وحتـى يمكـن للمادة أن تدور كلها ثانيـة حـول نفسـها لتظهـر سـلوكاً يختلـف كـل الاختـلاف عـن ثقـوب أوبنهايمر وسنايدر البالغة المثالية(3).

وكان تجديد الاهتمام بمسألة الثقوب السوداء، الـذي انبثـق مـن الاكتشـاف الحديـث جـداً للكوازارات (أو أشباه النجوم) quasars في أوائل الستينات قـد أثـار لـديَّ أفكـاري الخاصـة. وكانت طبيعة هذه الأجرام الفلكية البعيدة جداً الـتي يلفـت لمعانهـا الانتبـاه، قـد دفعـت بعـض الأشخاص إلى أن يفكروا بأن هناك شـيئاً يقبـع في مراكزهـا يشـبه ثقـوب أوبنهـايمر ــ سـنايدر السوداء. كما فكر كثيرون من جهة ثانية بأن فرض أوبنهايمر ـ سنايدر للتنـاظر الكـروي يمكـن أن يؤدي إلى صورة مضلّلة كلياً. على أن خاطرة عرضت لي (من ممارسة عمل كنت قـد قمـت به في مجال آخر) أن من الممكن أن تكون هناك مبرهنة رياضية دقيقة يجب البرهان عليهـا تثبـت بأن شذوذيات الزمكان يجب أن تكون محتمـة (وفقـاً لنظريـة النسـبية العامـة القياسـية)، وتـبرر بذلك صورة الثقب الأسود ـ بشرط أن يكون الانهيار قد وصل إلى نقطة هي مـن نـوع "نقطـة اللاعودة"، (لا يستخدم التناظر الكروي)، هذا ناهيك من أي دعوى أو برهان لنظرية مناسـبة. وكان هناك زميل زائر من الولايـات المتحـدة (هـو إ.روبنسـون Ivor Robinson) كـان قـد شغلني في محادثة لا تنتهي حول موضوع مختلـف كـل الاختـلاف حـين كنـا نسـير في الشـارع مقتربين من مكتبي في كلية بيربك Birbeck في لندن. وكانت المحادثة قد توقفت لبرهة عبرنا في أثنائها الطريق ووصلنا ثانية إلى الرصيف الآخر. وفي أثناء هذه اللحظات القليلة طبعاً، خطـرت لي فكرة، ولكن متابعة الحديث عندئذ محتها من عقلي!

وفي ذلك اليوم، وبعد أن رحل زميلي، عدت إلى مكتبي. وإني لأذكر أنه كان لـدي شعور غريب بالابتهاج لم أستطع أن أعرف سببه. فبدأت أدير في ذهني مختلف الأمور التي كـانت قـد حدثت لي خلال ذلك اليوم، في محاولة للعثور على ما كان قد سبب هـذا الابتهـاج. وبعـد أن حذفت الإمكانيات العديدة غير الملائمة، استحضرت أخيراً في ذهني تلك الفكرة الـتي عرضـت لي في أثناء اجتياز الشارع ـ وفي الحال أبهجتني الفكرة لأنهـا زودتـني بحل المسـألة الـتي كـانت تدور وتلف في مؤخرة رأسي. وكانت على مايبدو هي المعيار الـذي احتاجـه ــ والـذي دعوتـه فيما بعد "السطح المحجوز" trapped surface ـ فلم أحتج بعدئذ إلى وقـت طويـل لكـي أضـع مخطط البرهان على النظرية التي كنت أبحث عنها (Penrose 1965). وعلـى الرغـم مـن ذلـك فقد انقضت فترة قبل أن يصاغ البرهان صياغة متينة، ولكن الفكرة التي واتتني حين كنت أعـبر الشارع كانت هي المفتاح. (وإني لأتساءل أحياناً ما الذي كان يمكـن أن يحـدث لـو أن تجربـة أخرى مبهجة غير مهمة، هي التي حدثت لي في أثناء ذلك اليوم، فلربما لم يكن ليتاح لي أبداً أن أذكر فكرة السطح المحجوز على الإطلاق!).

وتحملني تلك الحكاية إلى مسألة أخرى تتعلق بالإلهام والبصيرة، وهـي أن للمعايـير الجماليـة منزلة رفيعة جداً في تكوين أحكامنا. ففي الفنون يمكن للمرء أن يقول إن هذه المعايير هـي الـتي لها الكلمـة الأولى. إذ تكـون الجماليـات هنـاك فائقـة الصنعـة والتعقيـد حتـى لقـد أفنـى بعـض الفلاسفة حياتهم في دراستها. أما في الرياضيـات والعلـوم، فقـد يجـادل بعضهـم بـأن دور هـذه المعايير عرضي لاغير وأن الكلمة العليا فيهـا للحقيقـة. ولكـن مـن المسـتحيل كمـا يبـدو فصـل الحقيقة عن الجماليات حين نُدخل مسألة الإلهام والبصيرة في حسابنا، بل إن لديَّ إحساساً بـأن الإعتقاد القوي بسلامة بريق الإلهام (وإن لم يكن موثوقاً مئة بالمئة، إلا أن عليَّ أن أضيـف، أنـه على الأقل، أصدق من مجرد مصادفـة) وأنـه مرتبـط ارتباطـاً وثيقـاً بصفاتـه الجماليـة. فللفكـرة الجميلة حظ أوفر من القبيحة بكثير في أن تكون صحيحة. وهذا على الأقل ما دلتني عليه تجربتي الخاصة، وما عبر عنـه الآخـرون مـن مشـاعر مناسـبة (انظـر Chandrasekhar 1987). ولقـد كتب هادامار (1945 ص 31) على سبيل المثال:

> ....من الواضح أنه مامن اكتشاف أو إبداع قيِّم يمكن أن يحتل مكانته من دون رغبة في الإبتكـار ولكننا نرى في حالة بوانكاريه شيئاً أكثر من ذلـك، إذ قـام تدخـل الإحسـاس بالجمـال بـدور وسـيلة الإبتكار التي لاغنى عنها. هكذا فقد وصلنا إلى نتيجتين، وهما:
>
> ـ أن الإبداع خيار.
>
> ـ وأن هذا الخيار يتحكم فيه إلزامياً الإحساس بالجمال العلمي.

كما لم يتورع ديراك مثلاً (عام 1982) عن أن يدعـي أن ***إحساسـه العـارم بالجمـال*** هـو الـذي مكنه من أن يحزر معادلة الإلكترون (وقد أشرنا إلى هذه المعادلة في الصفحة 342).

لاشـك بـأني أسـتطيع الاستشـهاد بالمزايـا الجمالية في تفكـيري الخـاص، سـواء أفي صلتهـا باليقين، الذي يمكن أن أشعر به في حالة الأفكار التي ربما كان بالإمكان وصفها بأنهـا "إلهاميـة" أم في حالة التخمينات "الرتيبة" التي يجب القيـام بهـا باسـتمرار حـين يتلمـس المـرء طريقـه نحـو الهدف المنشود. وكنت قد كتبت في هذا الموضوع في مكان آخر وبخاصة فيما يتعلق باكتشاف التبليط اللادوري الذي يمثله الشكلان 10-3 و 4 -11. فلا جدال بان المزايا الجمالية في النمـط الأول من نموذجي التبليط هذين ــ وليـس فحسـب في مظهـره المرئـي، بـل كذلـك في خواصـه الرياضية الخادعة ـ هو الذي أتاح للحدس أن يواتيني (وعلى الأرجح في "ومضة"، ولكـن بيقـين 60 ٪ فحسب، بأن ترتيب البلاطات فيه يمكن أن يكون ملزماً بقواعد توليفيـة ملائمـة (وكانـه تجميع لصور مقطعـة). وعمـا قريـب سـنرى المزيـد عـن نمـاذج هـذا التبليـط (انظـر Penrose 1974).

ولست أشك في أن أهمية المعايير الجمالية لا يقتصر سريانها على أحكام الإلهام الفورية، بل يسري أيضاً علـى الأحكـام الأكـثر شـيوعاً الـتي نطلقهـا دائمـاً في أثنـاء نشـاطنا الريـاضي (أو العلمي). وتأتي الحجة المتينة عادة في المرحلة الأخيرة! أما قبل ذلك، فعلى المـرء أن يطلـق عـدة تخمينات، وهنا في هذه التخمينات، يكون للقناعات الجمالية أهمية فائقة ـ ولكنها مقيدة دائمـاً بالإثبات المنطقي والوقائع المعروفة.

وهذه الأحكام هي التي أعدها علامة التفكـير الواعـي المـميزة. وفي تقديـري أنـه حتـى مـع وميض البصيرة المفاجئ، الذي ينبثق ظاهرياً كأنه مجهز بأكمله في العقل الباطن، يكون ***الشـعور*** هو الحكم، فإذا لم يكن للفكرة "رنين الصحة" عندئذ سرعان ما ترفض وتنسى (والطريف، أني نسيت عملياً سطحي المحجوز، ولكن ليس إلى الحد الذي عنيتـه، فـالفكرة تخـترق الشـعور مـدة تكفي لأن تخلف انطباعاً دائماً). ويمكن للرفض "الجمالي" الذي أشير إليه، أن يكون من القـوة، كما أفترض، إلى درجة أنه يمنع الأفكار غير الجذابة منعاً باتاً من أن تتوصل إلى أي مستوٍ دائـم له مكانته في الشعور.

فما هو رأيي إذن حيال دو ر العقل اللاواعي في التفكير الإلهـامي؟ إنـي أسـلم بـأن النتـائج [التي أمكن الوصول إليها هنا] ليست واضحة كمـا أحـب. ولكـن يبـدو أن العقـل اللاواعـي يقوم فعلاً بدور حيوي في التفكير الإلهامي. ولابد لي أن ألتقي مع الرأي القائل بأهمية العمليات اللاشعورية، كما عليَّ أن أوافق أيضاً على انه من غير الممكن أن يكون عمـل العقـل اللاواعـي هو مجرد إطلاق أفكار لا على التعيين، بل لابد أن هناك عملية اختيار قادرة ومذهلة، وهي الـتي تجعل العقل الواعي يحتدم بالأفكار التي لها حظ النجـاح فحسـب.....وهنـا أود أن اقـترح بـأن معايير الاختيار هذه ـ وهي إلى حد بعيد معايير "جمالية" من نوع ما ـ لابد أن تكون قد تـأثرت مسبقاً تأثراً شديداً بالرغبات الشعورية (كالشعور بالقباحة الذي قد يرافق الأفكار الرياضية التي لا تتسق مع مبادئ عامة سبق أن ثبتت).

وهنا لابد أن تثار مشكلة لها صلة بما سبق، وهي: ماالذي يكوِّن الأصالة الخالصة. يبدو لي أن هناك عاملين لهما دورهما، وهما عمليتا "الإعداد Putting- up" و "الإسقاط Shooting- down" ويخيل لي أن عملية الإعداد يمكن أن تكون إلى حد بعيد لا شعورية، وأن عملية الإسقاط هي إلى حد بعيد شعورية. ولا يمكن أن يكوِّن المرء أبداً أفكاراً جديدة من دون عملية إعداد مجدية. ولكن هذا "الإجراء" (أي عملية الإعداد) وحده لذاته ليس له قيمة كبيرة. إذ إن المرء بحاجة إلى إجراء فعال لتكوين أحكامه بحيث لايمكن أن تدوم معه سوى الأفكار التي لها حظ معقول في النجاح. ولنا في الأحلام مثال على ذلك. إذ يمكن أن تخطر على البال بسهولة أفكار غير مألوفة، ولكن لا يبقى منها سوى النذر اليسير بعد أحكام اليقظة الواعية المدققة. (فأنا من جهتي لم تخطر لي أبداً أي فكرة ناجحة في حالة الحلم، في حين أن آخرين ربما كانوا أوفر حظاً، مثل الكيمياوي كيكوليه Kikule، فمن الجائز أنه كان أوفر حظاً عند اكتشافه بنية البنزين). ففي رأيي أن عملية الاسقاط الواعية (أي إطلاق الحكم) هي العملية الأساسية في مسألة الأصالة، وليس عملية الإعداد اللاشعورية، ولكني أعرف أنه يمكن أن يأخذ آخرون عديدون بالرأي المخالف.

ولابد لي، قبل أن أترك الأمور على مثل هذه الحال غير المرضية، من ان أذكر سمة أخرى مذهلة من سمات التفكير الإلهامي، وهي طبيعته الإحاطية التي كانت حكاية بوانكاريه المذكورة أعلاه مثالاً مدهشاً عليها. فلقد طوقت الفكرة التي خطرت على باله في لحظة خاطفة مجالاً واسعاً من التفكير الرياضي[x]. ولكن لربما كان القارئ غير الرياضي، أسرع تقبلاً (وإن لم يكن أيسر تفهماً حتماً) للطريقة التي يمكن أن يحتفظ بها (بعض) الفنانين بكامل ابداعهم دفعة واحدة في أذهانهم. وهاكم مثالاً قدمه موتسارت Mozart بحماس (كما سجله هادامار في كتابه عام 1945 ص 16):

عندما أكون هانيء البال حسن المزاج، أو عندما أقوم بنزهة في العربة، أو على قدمي، بعد وجبة جيدة، أو في الليل حين لا أستطيع النوم، تشق الأفكار طريقها في رأسي بالسهولة التي يمكن لأي امرئ أن يتمناها. فياترى من اين تأتي وكيف؟ أنا لاأدري، وليس ثمة ما افعله حيالها. فأحتفظ بما يعجبني منها في رأسي وأترنم به، أو هذا على الأقل ما قاله لي الآخرون بأني أفعله. وما إن تكون فكرة اللحن الأساسي (الموضوع theme) جاهزة لدي، حتى يخطر لي لحن آخر يربط نفسه بالأول وفقاً للقواعد التي يتطلبها التأليف بمجموعه: أي أن الكونتربونت conterpoint والجزء الذي تعزفه كل آلة وجميع القطع اللحنية، كلها تخرج العمل أخيراً بأكمله. وعندئذ تصبح روحي متأججة بالإلهام. فينمو العمل، وأستمر في توسيعه، مع استيعابي له بصورة أوضح فأوضح إلى أن ينتهي من التأليف كله

---

[x] فقد تبين لبوانكاريه فيما بعد أن الفكرة الرائعة التي خطرت له لها صلة وثيقة بمشكلة أخرى كان يهتم بها في الحسابيات arithmetic وكذلك بالمعادلات التفاضلية.

في مخيلتي على الرغم من أنه قد يكون طويلاً. وحينذاك، يلتقطه عقلي كلمح العين السريع للوحة جميلة أو لشاب وسيم. فهو لا يأتيني متوالياً بمختلف أجزائه منجزة بالتفصيل كما ستكون فيما بعد، وإنما يأتيني كاملاً تسمعني إياه مخيلتي.

وهكذا يبدو لي أن هذه الظاهرة تتفق مع مخطط فكرة إعداد الأحكام / إسقاطها. فيبدو أن الإعداد لا شعوري ("لا علاقة لي به") على الرغم من أنه انتقائي حتماً إلى أبعد الحدود، في حين أن الاسقاط هو الحكم الواعي الذي يقوِّم الوضع (" وأحتفظ بما يعجبني منها....") كما أن إحاطية التفكير الإلهامي واضحة جداً في أقوال موتسارت (فلا يأتيني على التوالي...بل تسمعني إياه مخيلتي كاملا) وكذلك في أقوال بوانكاريه (" لم أتحقق الفكرة، إذ لم يتسن لي الوقت"). ولابد لي إضافة إلى ما سبق، من أن أؤكد بأن هناك إحاطية ملحوظة حاضرة أصلاً في تفكيرنا الشعوري بوجه عام. وهذه مسألة سأعود إليها عما قريب.

طبيعة التفكير اللا لغوية

كان من الأمور الأساسية التي أشار إليها هادامار في دراسته للتفكير الخلاّق، دحضه القاطع للمزاعم التي لا يزال يُعبرَّ عنها باسم فرضية، والتي تقول إن الصياغة اللفظية ضرورية للتفكير. وهنا يصعب على المرء أن يجد ما هو أفضل من إعادة أقوال ألبرت أينشتين في رسالته إلى هادامار حول هذا الموضوع:

> يبدو أن الكلمات واللغة: كما تكتب أو تلفظ، لا تقوم بأي دور في آلية تفكيري. أما الموجودات النفسية التي يبدو أني أستخدمها عناصر للتفكير، فهي إشارات مؤكدة وصور متفاوتة الوضوح يمكن تكرارها "إرادياً" أو تركيبها.....وهذه العناصر المذكورة أعلاه هي، بالنسبة لحالتي، من النوع البصري والعضلي. أما الكلمات التقليدية أو أي إشارات أخرى، فلا بد أن يجري البحث عنها بعناء في المرحلة الثانية فحسب، أي عندما تثبت اللعبة المتعلقة بالتفكير ثبوتاً كافياً يمكن معه تكراره عند الرغبة.

وهناك عالم الوراثة الفذ غالتون Francis Galton، فهو شاهد يجدر ذكره أيضاً:

> إن عدم تفكيري بالكلمات بالسهولة نفسها التي أفكر فيها بوسيلة أخرى، هو عائق جدي لي عند الكتابة، وبخاصة عندما أود التعبير عن أفكاري. فما يحدث غالباً بعد عناء العمل والتوصل إلى نتائج واضحة كل الوضوح، وترضى عنها نفسي، أني حين أحاول أن أعبر عنها باللغة، أشعر عندئذ أن عليّ أن أبدأ بوضع نفسي في مستوٍ عقلي مختلف كل الاختلاف. إذ يجب أن أترجم أفكاري إلى لغة لا تسير معها جنباً إلى جنب، لذلك أبدد وقتاً طويلاً في البحث عن الكلمات والجمل المناسبة. وحين يتطلب الأمر مني أن أتحدث فجأة، أشعر بأن حديثي غامض جداً في أغلب الأحيان بسبب الألفاظ الخرقاء وحدها، وليس بسبب الرغبة في وضوح الإدراك. وهذه المشكلة هي إحدى المنغصات الصغيرة في حياتي.

وقد كتب هادامار أيضاً:

إني أؤكد بأن الكلمات تكون غائبة كلياً حين أفكر تفكيراً حقيقياً، وتصبح حالي كحال غـالتون تماماً، بمعنى أني، حتى حين أقرأ سؤالاً ما أو أسمعه، تختفي كل كلمة في اللحظة نفسها الـتي أبدأ فيها التفكير في هذا السؤال. وإنـي لأتفـق كليـاً مـع شـوبنهاور Schopenhauer حين كتـب: "تمـوت الأفكار حين تحتويها الكلمات".

لقـد أوردت هـذه الأمثلـة لاتفاقهـا الكبـير مـع طرقـي الخاصـة في التفكـير، فانـا أفكـــر في الرياضيات بطريقة بصرية وبدلالة مفاهيم غير لفظية، على الرغم من أن الأفكار تسير في أغلـب الأحيان جنباً إلى جنب مع شرح لفظي تافه يكاد يكون عديم الفائدة، وأشبه ما يكون بـ "هـذا الشيء يتمشى مع هذا الشـيء وذاك الشـيء يتمشـى مـع ذاك الشـيء". (ويمكنـني أن أسـتخدم الكلمات أحياناً للاستدلالات المنطقية البسيطة). ولكني كثيراً ما اعاني أنا أيضاً من الصعوبـات التي يلاقيها المفكرون في ترجمة أفكارهم إلى كلمات. ويعود السـبب في أغلـب الأحيـان إلى أن هذه الكلمات ببساطة لا تصلح للتعبير عن المفـاهيم المطلوبـة. فأنـا في الواقـع كثـيراً مـا اجـري حساباتي بأن استخدم مخططات مصممة خصيصاً لهذا الغرض تكون لي ملخصاً مساعداً لبعـض أنماط التعابير الجبرية (انظر Penrose and Rindler 1948 الصفحـات 424–34). فـإذا لـزم الأمر ترجمة هذه المخططات إلى كلمات فستكون تلك عملية ثقيلة، وهذا ما لا أفعله إلا كملاذ أخير فيما لو أصبح من الضروري إعطاء شرح مفصل للآخرين. وهنا أورد ملاحظة لها صلة بما سبق، وهي أنه قد يصادف أني إذا كنت قد ركزت اهتمامي بقـوة في الرياضيـات ولبرهـة مـن الزمن، وأراد أحدهم أن يدير معي فجأة حديثاً ما، فإني أجد نفسي غير قادر تقريباً على الكلام لعدة ثوان.

وهذا لا يعني أني لا أفكر أحياناً بالكلمات، بل كل ما في الأمر أنـي أجـد الكلمـات تكـاد تكون بلا فائدة في التفكير الرياضي. ولكن هناك أنواعاً من التفكير، مثل التفلسف مثـلاً، يبـدو أنه من الأفضل فيها اتباع التعبير اللفظي. وربما كان هذا هو السبب، فيما يبدو، الذي يؤيد فيـه العديد من الفلاسفة الرأي القائل إن اللغة أساسية للتفكير الذكي أو الوعـي! ومهمـا يكـن مـن أمر فإنه ما من شك بأن الأشخاص المختلفين يفكرون بطرق مختلفة ـ كمـا دلتـني قطعاً تجربـتي الخاصة، حتى بين الرياضيين أنفسهم. ويبدو أن قطبي التفكير الرياضي الأساسيين هما التحليلـي والهندسي. وما يلفت النظر أن هادامار كان يعد نفسه ميالاً إلى الجانب التحليلـي، علـى الرغـم من أنه كان يستخدم الصور البصرية في تفكيره الرياضي بدلاً من الصور اللفظية. أمـا أنـا فـإني منحاز جداً إلى الجانب الهندسي في التفكير، ولكن الخلافات بين الرياضيين عامة، تتـوزع علـى نطاق واسع جداً.

وإذا قبلنا نهائياً بأن الكثير من التفكير الواعي، يمكن أن يكون فعلاً ذا طبيعـة غـير كلاميـة، وهذه النتيجة بالنسبة لعقليتي أنـا، هـي نتيجـة لا مفـر منهـا للملاحظـات الـتي مـن قبيـل تلـك

المذكورة أعلاه، عندئذ قد لا يجد القارئ صعوبة في أن يعتقد بأن مثل هذا التفكير يمكن ان يوجد أيضاً مقوم غير خوارزمي!

وكنت قد اشرت في الفصل التاسع كما نذكر (ص452) إلى وجهة نظر يتكرر إيرادها، وهي أن نصف الدماغ الوحيد القادر على الكلام (وهو النصف الأيسر عند الأكثرية الواسعة) لابد أن يكون قادراً أيضاً على الشعور. ولكن لابد أن يتضح للقارئ، بعد المناقشة أعلاه، لماذا لا أجد وجهة النظر هذه مقبولة إطلاقاً، فأنا لاأعرف: هل يميل الرياضيون بمجموعهم إلى استخدام هذا الجانب من دماغهم أكثر أم إلى الآخر، ولكن لا مجال للشك في مستوي الشعور المرتفع الذي يتطلبه التفكير الرياضي الأصيل. ففي حين يبدو أن التفكير التحليلي هو في الدرجة الأولى من اختصاص الجانب الأيسر من الدماغ، فإن التفكير الهندسي كثيراً ما أثبت أنه في الجانب الأيمن، لذلك كان من المعقول جداً أن يقدروا بأن شطراً كبيراً من النشاط الرياضي الشعوري يتم في الحقيقة في الجانب الأيمن.

الشعور عند الحيوان؟

لابد لي قبل ان أترك موضوع أهمية الصياغة الكلامية بالنسبة للشعور، من أن أتوجه بسؤال سبق أن أثير قبل قليل، وهو: هل يمكن للحيوانات اللاآدمية أن تكون ذات شعور؟ يبدو لي أن الناس يتخذون من عدم قدرة الحيوان على الكلام حجة لدحض فكرة امتلاكه لأدنى قدر من الشعور ـ ولدحض أن لديه بالتالي أدنى "الحقوق". وهنا يمكن للقارئ أن يدرك بحق أنني أرى سياق هذا الدليل غير مقبول، لأن الكثير من التفكير الشعوري المعقد (مثل الرياضيات) يمكن أن ينفَّذ من دون هذه الصياغة الكلامية. كما يحاولون أحياناً أن يثبتوا بأن في الجانب اليمن من الدماغ "قليلاً" من الشعور كالذي عند الشمبانزي، وحجتهم أيضاً هي افتقار هذا الجانب للقدرة على الكلام. (انظر Le Doux 1985 الصفحات 197-216).

وهناك جدال حاد حول الشمبانزي والغوريلا: هل يستطيعان في الواقع الصياغة اللغوية الأصلية حين يهيأ لهما استخدام لغة ***الإشارات*** بدلاً من الكلام بطريقة البشر العادية (التي لا يستطيعان اتباعها بسبب افتقارهما للحبال الصوتية المناسبة). (راجع مقالات مختلفة في: Gronnfield و Blackemore 1987). ومهما يكن من أمر هذا الجدل، فإنه يبدو جلياً بأنهما قادران على الأقل، على التواصل إلى درجة معينة بدائية بهذه الوسائل. وفي اعتقادي أن عدم موافقة بعض الناس على تسمية هذا التواصل "صياغة لغوية" فيه شيء من التحامل والعناد. وربما كان غرضهم من إنكار انتساب القردة إلى زمن المتكلمين، هو إبعادهم [x] عن قائمة الكائنات ذات الشعور.

---

[x] لقد استعملنا في كل ما يلي صيغة المذكر السالم في الجمع لأن الحديث عن هذه الحيوانات يعاملها وكأنها حيوانات واعية.(ولدراسة اللغة والادراك عند الحيوان راجع كتاب دمتري غوريف "لغز الإدراك".دار التقدم، موسكو1986)

وإذا ما تركنا مسألة الكلام جانباً، فإن هناك ما يؤكد تأكيداً جيداً بأن الشمبانزي قادر على *الإلهام* الأصيل. فكونراد لورنز Konrad Lorenz (1972) يصف شمبانزي حصر في غرفة عُلّقت في سقفها موزة بعيدة عن متناول اليد، ووضعت فيها علبة في مكان قصي من الغرفة:

> لقد أقلقت المشكلة راحته، وراح يعود إليها من جديد. وفجأة وإذا بوجهه الذي كان متجهماً، يعلوه البشر الذي لا توجد وسيلة أخرى لوصفه ـ فقد تحركت عيناه عندئذ من الموزة إلى الفضاء الفارغ بينها وبين الأرض ومن الأرض إلى العلبة ثم عاد ثانية بنظره من العلبة إلى الفضاء ومن الفضاء إلى الموزة. ثم أعقب هذه اللحظة بصرخة الفرح، وتشقلب فوق العلبة بفرح عارم ودفعها وهو ممتلئ ثقة بالنجاح إلى ما تحت الموزة. وما من إنسان كان يراقبه، واستطاع أن يشك بأن القردة الشبيهة بالإنسان تمارس "صرخة النجاح" الأصيلة.

وهنا نلاحظ أن الشمبانزي كان في تجربته مثلما كان بوانكاريه عندما دنا من الحافلة، فكلاهما كان واثقاً من نجاحه قبل أن يتحقق فكرته، فإذا كنت على حق بأن مثل هذه الأحكام تتطلب شعوراً، فعندئذ لدينا دليل هنا بأن الحيوانات اللاآدمية يمكنها أن تشعر فعلاً.

وهناك علاوة على ماسبق مسألة مهمة يطرحها سلوك (الدلافين والحيتان)، إذ يلاحظ أن مخ الدلفين يمكن ان يماثل مخنا نحن بكبره (أو حتى أكبر منه). كما يمكن لأحد الدلافين أيضاً أن يبعث إلى الآخر بإشارات صوتية بالغة التعقيد. وليس بعيداً أبداً أن يكون مخهم الكبير قد فرضته حاجة أخرى غير "الذكاء" في المعيار الإنساني أو شبه الإنساني. ثم لكونهم يفتقرون إلى اليد اللاقطة، فهم لا يستطيعون أن يبنوا حضارة من النوع الذي نقدره نحن ـ وعلى الرغم من أنهم، وللسبب نفسه، لا يستطيعون الكتابة، فقد كان من الممكن أن يكونوا فلاسفة ويتساءلون عن معنى الحياة، ولماذا هم هناك! فهل باستطاعتهم أن ينقلوا في بعض الأحيان مشاعرهم "بوعيهم" بواسطة إشاراتهم الصوتية تحت الماء. وأنا شخصياً لست على علم بأي بحث يدلنا على أنهم يستعملون جانباً خاصاً من أدمغتهم لكي " يتكلموا" ويتواصل أحدهم مع الآخر. أما فيما يتصل بعمليات "الدماغ المشطور" التي سبق أن أنجزت على الآدميين بكل ما يترتب عليها من نتائج محيرة مثل استمرار "الذات" فإنه يجب أن يشار إلى أن الدلفين لاينام (4) بكامل دماغه في آن واحد،بل ينام جانب واحد من الدماغ في كل مرة [أي كالدماغ المشطور]، فلا بد أنه سيكون أمراً متفقاً لنا لو استطعنا أن نسأله كيف يكون شعوره تجاه استمرار وعيه.

الاتصال بعالم أفلاطون

لقد سبق لي أن ذكرت أن الناس على اختلاف أهوائهم يفكرون بطرق مختلفة عديدة ـ وأنه حتى الرياضيون منهم يفكرون بهذه الطرق المختلفة في رياضياتهم. وإني لأذكر أنني حين كنت على وشك الدخول في الجامعة لدراسة هذا الموضوع (الرياضيات) كنت أتوقع أن أجد

الآخرين، الذين سيصبحون زملائي في الرياضيات، يفكرون إلى حد ما مثل ما أفكر. إذ كانت لدي تجربتي في المدرسة، وهي أن زملائي في الصف كان يبدو أنهم يفكرون بطريقة، كنت أجدها مربكة إلى حد ما، وتختلف عن طريقتي. وقلت في نفسي حينذاك بنشوة، الآن سأجد زملاء أستطيع التواصل معهم بسهولة أكبر بكثير! بعضهم يفكر بطريقة بجدية أكثر من طريقتي، وبعضهم أقل، ولكنهم سيشاركونني جميعهم بطول الموجة نفسه في التفكير. ولكن كم كنت على خطأ! بل إني لأعتقد أني صادفت اختلافات في طريقة التفكير. أكثر بكثير مما مر علي قبل ذلك على الإطلاق! فتفكيري كان هندسياً أكثر وتحليلياً أقل من الآخرين، ولكن كانت هناك اختلافات عديدة أخرى بين طرق تفكير زملائي المختلفين. وكان الاضطراب يصيبني دائماً بوجه خاص عند تحضير وصف كلامي للدساتير الرياضية. في حين يبدو أن العديد من زملائي لم يكونوا يعانون من مثل هذه الصعوبة.

فمن تجربتي (وهي تجربة شائعة) أنه حين يحاول أحد الزملاء أن يشرح لي أمراً ما في الرياضيات، يكون عليّ عندئذ أن أصغي إليه بانتباه ولكن من غير أن أفهم كلياً تقريباً الروابط المنطقية بين كل مجموعة من الكلمات والتي تليها. ومع ذلك، تتكون لدي صورة يخمنها عقلي وفق الأفكار التي حاول أن ينقلها إلي، مكونة بأكملها وفق تعابيري الخاصة، من غير أن تربطها فيما يبدو، سوى صلات قليلة مع الصور العقلية التي كانت تكوِّن أسس الفهم الخاص عند زميلي. وبعد ذلك علي أن أجيب. فأجد عادة وأنا مندهش حقاً، ملاحظاتي الخاصة مقبولة لأنها مناسبة، وأن المحادثة بيننا تتقدم وتتراجع متبعة هذه الطريق. فيتضح لنا في نهاية الأمر أن ما جرى كان اتصالاً إيجابياً خالصاً، برغم أنه لم يفهم أحد منا، كما بدا لنا، من الجمل الفعلية التي صرح بها الآخر سوى العدد القليل جداً. وقد وجدت أن هذه الظاهرة في سنواتي الأخيرة التي صرت فيها رياضياً محترفاً (أو فيزيائياً) لاتزال صحيحة كما كانت عليه قبل تخرجي. وربما تكون خبرتي الرياضية قد ازدادت، فقد تحسنت قليلاً في تقدير ما يعنيه الآخرون بشروحهم، بل لربما أني تحسنت قليلاً في التماس الأعذار للآخرين على طريقة تفكيرهم حين أشرح الأمور أنا نفسي. ولكن لم يتغير شيء في الجوهر نفسه.

فكيف يكون الاتصال كله إذن شيئاً ممكناً وفقاً لهذا الأسلوب الغريب. إني لأجد في أغلب الأحيان أن في ذلك معضلة. ولكني أود الآن أن أتجرأ على وضع شرح مناسب لها. لأني أعتقد أن من الممكن أن يكون لهذه المسألة صلة وثيقة بالمسائل الأخرى التي طرحتها. إن المشكلة الأساسية هي أننا عند نقل المعلومات الرياضية، لا ننقل مجرد وقائع. لأنه لابد لتبليغ سلسلة من الوقائع أو الأحداث (العارضة) من شخص إلى آخر، من أن ينص الأول عليها بكل عناية وأن ينقلها الثاني فرادى (واحداً إثر واحد) ولكن محتوى الرياضيات من الوقائع ضئيل. إذ إن الدعاوي الرياضية هي حقائق ضرورية (وإلا لكانت أكاذيب ضرورية) وحتى إذا كانت إفادة (أو رواية) الرياضي الأول لا تمثل سوى تلمس لمثل هذه الحقيقة الضرورية، فستكون هذه

الحقيقة هي نفسها التي تجد الطريق إلى الرياضي الثاني، بشرط أن يكون الثاني قد فهم [الأول] فهماً كافياً. وقد تختلف صور الثاني العقلية في تفصيلاتها عن صور الأول، كما يمكن أن يختلف وصفاهما الكلاميان. ولكن الفكرة الرياضية ذات الشأن ستكون قد مرت من الأول إلى الثاني.

وعلى هذا، لم يكن هذا النمط من الاتصال ممكناً على الإطلاق لو لم تكن الحقائق الرياضية ***المهمة أو الجوهرية*** موزعة بصورة متناثرة إلى حد ما بين الحقائق الرياضية عامة. فلو كانت الحقيقة المراد نقلها هي إفادة غير هامة، مثل: 4897×512=2507264 لكان من الضروري فعلاً عندئذ أن يكون الثاني متفهماً للأول لكي يتم نقل الإفادة. ولكن في حال إفادة رياضية مهمة، يمكن للمرء أن يتشبَّث بالمعنى المقصود، حتى ولو كان وصفه معطى دونما دقة في التعبير.

وهنا قد يبدو أن في الأمر مفارقة، لأن الدقة في الرياضيات هي التي لها الكلمة الأولى، ففي السرد المدون لابد من بذل عناية كبيرة بالفعل لكي تشيع الثقة بأن مختلف الإفادات دقيقة وتامة في آن واحد. وبرغم ذلك، يمكن أن يكون لهذه الدقة في البدء تأثير مثبط أحياناً حين يراد نقل الفكرة الرياضية (الذي يتم عادة بطريقة كلامية) بل قد يتطلب الأمر صيغة وصفية للاتصال تكون أقل دقة. لكن فيما بعد، حين تكون الفكرة قد فهمت في جوهرها عندئذ يمكن فحص التفاصيل في مرحلة لاحقة.

ترى كيف يمكن أن يتم تبادل الأفكار الرياضية بهذه الطريقة؟ إني أتصور بأنه كلما أدرك العقل فكرة رياضية، اتصل بعالَم أفلاطون للأفكار الرياضية. (لأن لهذه الأفكار، كما نذكر، وجودها المستقل من وجهة نظر أفلاطون، وتقطن عالم أفلاطون المثالي الذي لا يمكن بلوغه إلا بالفكرة، راجع الصفحتين 132و201). فحين "يرى" المرء حقيقة رياضية، يخترق شعوره هذا العالم من الأفكار، ويقيم اتصالاً مباشراً معه (إذ "يمكن بلوغه بالفكر"). وقد سبق لي أن وصفت هذه "الرؤية" عند الحديث عن نظرية غودل، ولكنها في الحقيقة جوهر الفهم الرياضي. وحين يتصل الرياضيون بعضهم ببعض، يكون ذلك ميسراً لهم، لأن لدى كل من منهم ***طريقاً مباشرة إلى الحقيقة***، إذ إن شعور كل منهم في وضع يؤهله لأن يدرك الحقائق الرياضية مباشرة عن طريق عملية "الرؤية" هذه (وهذا حق، فغالباً ما يرافق عملية الإدراك هذه بضع كلمات، مثل: "آه، لقد فهمت!") ولما كان باستطاعة كل منهم، الاتصال مباشرة بعالم أفلاطون، فهم يستطيعون الاتصال بعضهم ببعض بسهولة أكبر مما يمكن للمرء أن يتوقعه. وحين يقوم أحدهم بالاتصال الأفلاطوني، يمكن أن تكون الصور العقلية لديه غير ما لدى الآخرين، ولكن ما يجعل

الاتصال بينهم ممكناً هو أن كلاً منهم على اتصال مباشر مع هذا العـالم الأفلاطونـي نفسـه ذي الوجود الخارجي[x].

فالعقل تبعاً لوجهة النظر هذه قادر دائماً على هذا الاتصال المباشر. ولكن ما يمكن أن يـأتي عن طريقه في الوقت المناسب، ليس سوى القليل. والاكتشاف الرياضي هو في حقيقتـه توسيع لمجال هذا الاتصال. ولما كانت الحقـائق الرياضيـة هـي حقـائق ضروريـة، لذلـك، ونتيجـة لهـذه الحقيقة، ما من "معلومات" فعلية بالمعنى التقـني تنتقـل إلى المكتشـف، بـل إن المعلومات كلهـا كانت هناك [في العالم الأفلاطوني] طيلة الوقت. ولم تكن المسـألة سـوى مسـألة وضـع أشياء بعضها مع بعض و "رؤية" الجواب! وهذا ما يتفـق جـداً مـع فكـرة أفلاطـون نفسـه القائلـة إن الاكتشاف (الرياضي مثلاً) هو مجرد شكل من أشكال التذكر. وهـذا حـق، فغالبـاً مـا أدهشـني وجود تماثل بين مجرد عدم المقدرة على تذكر اسم أحد الأشـخاص، ومجـرد المقـدرة علـى إيجـاد الفكرة الرياضية الصحيحة. ففي كل مـن الحـالتين يجـري البحـث عـن فكـرة هـي، بمعنـى مـا، موجودة سابقاً في العقل، على الرغم من أن هذه الصيغة من التعبير [التذكر] ليست مألوفة تمامـاً في حال الفكرة الرياضية غير المكتشفة.

ولكن طريقة النظـر هـذه إلى الأمـور، لا يمكـن أن تكـون مفيـدة في حـال نقـل المعلومـات الرياضية إلا إذا تخيلنا أن وجود الأفكار الرياضية المهمة والجوهرية، أقوى إلى حد ما من وجـود الأفكار التافهة وغير المهمة. وهذه الملاحظة سيكون لها مدلولها فيما يتصل بالاعتبارات التأمليـة التي سترد في المقطع التالي.

نظرة في الواقع الفيزيائي

لابد لكل من لديه وجهة نظر حول الطريقة التي أمكن أن يظهر بها الشعور، في هذا العـالم المكون من واقع فيزيائي، من أن يطرح، ولو ضمناً على الأقل، مشكلة الواقع الفيزيائي نفسه.

فأصحاب وجهة نظر الذكاء الاصطناعي القوي، مثلاً، يصرون علـى أن "العقـل" تتجسـده خوارزمية معقدة تعقيداً كافياً وأنه يكتشف وجوده حين يـدار عمـل هـذه الخوارزميـة بواسـطة أشياء من العالم الفيزيائي. ولكن ليس مهماً لتحقيـق ذلـك تحديـد نـوع هـذه الأشـياء بـالفعل. فسواء أكانت إشارات عصبية أم تيارات كهربائية عـبر الأسـلاك، أم مسـننات، أم بكـرات، أم أنابيب مياه، فهي كلها صالحة وبالقدر نفسه، وإنما الأهميـة كـل الأهميـة للخوارزميـة نفسـها. ولكن يبدو أنه لكي "توجد" الخوارزمية بمعزل عن أي تجسيد فيزيـائي خـاص لابـد عندئـذ مـن تبني وجهة نظر أفلاطونية في الرياضيات. إذ إنـه يصعـب علـى مـن يدعـم الذكـاء الاصطنـاعي

[x] باختصار: إن مايريد المؤلف قوله هو: على الرغم من اختلاف طرق الرؤية عند الريـاضيين، فـإنهم يتفـاهمون، لا لأن اللغة تيسر هذا الأمر فعلاً بل لأن عالم الرياضيات مكشوف لديهم كشفاً وجدانياً أو قل إنه جزء من بنية عقلهم الـتي يسميها عالم أفلاطون وعن طريقه يتم هذا التفاهم برغم اختلافات الصور وطرق الفهم.

القوي أن يتبنى وجهة النظر البديلة وهي أن "المفاهيم الرياضية لاتوجد إلا في العقول" [وليس في عالم أفلاطوني]، لأن ذلك يعني الدوران بلا نهاية، ويتطلب وجوداً مسبقاً للعقول لكي توجد الخوارزميات، ووجوداً مسبقاً للخوارزميات لكي توجد العقول. لذلك [ولتجنب العالم الأفلاطوني] لم يكن باستطاعتهم إلا أن يحاولوا السير في اتجاه آخر وهو أن الخوارزميات يمكن أن توجد في صورة علامات على قطعة من الورق أو اتجاهات تمغنط في قطعة من الحديد، أو انتقال شحنات في ذاكرة حاسوب. غير أن هذه التدابير في المسائل المادية لا تؤلف بذاتها خوارزمياً، ولابد لكي تصبح كذلك، من *تأويلها*، أي من امكانية *فك رموز* هذه التدابير. الأمر الذي يتوقف على اللغة التي كتبت بها الخوارزميات. وهذا ما يتطلب ثانية وجوداً مسبقاً لعقل "يفهم" اللغة، وهكذا نعود من جديد إلى حيث كنا. وعلى هذا، إذا قبلنا إذاً بأن الخوارزميات تقيم في عالم أفلاطون، وأن هذا العالم، نتيجة لذلك، موجود وفقاً لوجهة نظر الذكاء الاصطناعي القوي، حيث يمكن أن توجد العقول، يبقى علينا عندئذ أن نواجه سؤالاً آخر وهو كيف يرتبط هذان العالمان: الفيزيائي والأفلاطوني، أحدهما بالآخر. وهذه المسألة، كما يبدو لي، هي رواية الذكاء الاصطناعي القوي لمشكلة الرابطة عقل ـ جسم.

أما وجهة نظري أنا فتختلف عن هذه، لاعتقادي بأن العقول (الواعية) ليست كيانات خوارزمية، ولكني منبهت بعض الشيء من اكتشافي لوجود عدد كبير من النقاط المشتركة بين وجهة نظر الذكاء الاصطناعي القوي وبين وجهة نظري أنا. فلقد نوهت [سابقاً] إلى اعتقادي بأن الشعور يقترن بإحكام مع الإحساس بالحقائق الضرورية، وبواسطته يحقق اتصالاً مباشراً مع عالم أفلاطون للمفاهيم الرياضية. ولكن ليس هذا بالإجراء الخوارزمي ـــ ثم إن الخوارزميات ليست هي ما يمكن أن يقيم في هذا العالم الذي له عندنا شأن خاص ـــ ولكن هاهي مشكلة الرابطة عقل ـ جسم تظهر لنا من جديد بأنها ترتبط ارتباطاً وثيقاً، ووفقاً لهذه النظرية، بتلك المشكلة، وهي: كيف يرتبط عالم أفلاطون بالعالم "الواقعي" المكون من اشياء فيزيائية.

ولقد رأينا في الفصلين الخامس والسادس إلى أي مدى يبدو العالم الفيزيائي الواقعي متفقاً اتفاقاً يلفت النظر مع المخططات schemes الرياضية الدقيقة جداً (*النظريات الفخمة* The Superb Theories ص194). وغالباً ما لوحظ كم هي خارقة تلك الدقة فعلاً (راجع بخاصة Wigner 1960) حتى ليصعب عليَّ أن أصدق، كما حاول بعضهم أن يؤكد، أن هذه النظريات *الفخمة* قد أمكنها أن تظهر بمجرد اصطفاء الأفكار اصطفاءً طبيعياً عشوائياً لايدع على قيد الحياة سوى الأفكار الصالحة. لأن هذه الأفكار الصالحة ببساطة، هي أصلح بكثير من ان تكون مجرد أفكار بقيت من بين تلك التي ظهرت بهذه الطريقة العشوائية. ولابد بدلاً من ذلك أن يكون ثمة سبب أساسي عميق لهذا الاتفاق بين الرياضيات والفيزياء، أعني بين عالم أفلاطون والعالم الفيزيائي.

وحين يتحدث المرء عن عالم أفلاطون دون سواه، يكون قد أسبغ عليه نوعاً من الواقعية التي يمكن موازنتها، بطريقة ما، بواقعية العالم الفيزيائي. ثم إن واقعية العالم الفيزيائي تبدو [اليوم] أكثر ضبابية مما كانت تبدو عليه قبل ظهور النظريات **الفخمة**، أي نظرية النسبية ونظرية الكم (انظر الملاحظات في الصفحات 194و195ولاسيما 340). فلقد صنعت لنا هذه النظريات بدقتها الكبيرة وجوداً رياضياً، مجرداً تقريباً، للحقيقة الفيزيائية الراهنة. فهل هذا، بصورة ما، مفارقة؟ كيف تصبح الحقيقة الملموسة مجردة ورياضية؟ فلربما كان هذا الأمر هو الوجه الآخر للمشكلة التالية: كيف يمكن للمفاهيم الرياضية المجردة أن تنجز في عالم أفلاطون ما يشبه الواقع الملموس. إذاً لربما كان العالمان هما، بمعنى ما، عالم واحد في واقع الأمر؟ (Wigner 1960، Penrose 1979، Borrow 1988، وكذلك Atkins 1987).

وعلى الرغم من أني أشعر بتعاطف قوي مع فكرة المطابقة الفعلية هذه بين العالمين، إلا أنه لابد من وجود شيء في القضية أكثر من مجرد هذه المطابقة. إذ يبدو أن لبعض الحقائق الرياضية، كما ذكرت في الفصل الثالث، وسابقاً في هذا الفصل، واقعية أفلاطونية أقوى من غيرها (أي أنها "أعمق" و"أكثر أهمية" و"أكثر خصوبة"؟) فلابد أن هذه الحقائق، هي تلك التي تتطابق بقوة أكثر مع مكونات الحقيقة الفيزيائية. (ومثال منظومة الأعداد العقدية، الواردة في الفصل الثالث، مثال في صميم الموضوع، لكونها المقومات الأساسية في ميكانيك الكم، فهي سعات الاحتمال) فبهذه المطابقة، قد نصبح أكثر فهماً للطريقة التي تتمكن بها العقول، كما يبدو، أن تُظهر رابطة من نوع ما بين العالم الفيزيائي وعالم أفلاطون الرياضي. ولنذكر أيضاً أن هناك، كما قلنا في الفصل الرابع، عدة أقسام من العالم الرياضي ليس لها طبيعة خوارزمية، مع أنها تعد من أعمق وأهم أقسام الرياضيات. لذلك قد يبدو من المرجح، استناداً إلى وجهة النظر التي كنت أحاول شرحها [حول المطابقة]، أنه لابد أن يكون للفعاليات اللاخوارزمية دور مهم جداً في العالم الفيزيائي. بل إني أقترح هنا أن هذا الدور مرتبط ارتباطاً حميماً بمفهوم "العقل" نفسه.

الحتمية والحتمية القوية

لم أتحدث إلى الآن إلا القليل عن مشكلة "الإرادة الحرة" التي تعد عادة القضية الأساسية في الجانب ***الفعال*** من مشكلة الرابطة عقل ـ جسم، وركزت جهودي بدلاً من ذلك على اقتراحي بأن هناك جانباً أساسياً ***غير خوارزمي*** في الدور الذي يقوم به نشاط الشعور. وهنا تثار عادة مسألة الإرادة الحرة بربطها بمشكلة الحتمية في الفيزياء. ففي معظم نظرياتنا ***الفخمة*** SUPERB تسود الحتمية القطعية، بمعنى أنه إذا كانت حالة المنظومة معروفة في أي وقت من الأوقات(5)، فإن حالاتها في كل مايلي (أو ماسبق أيضاً في الحقيقة) من الأوقات ستكون محددة كل التحديد بمعادلات النظرية. فلا مكان على هذا النحو "للإرادة الحرة"، لأن سلوك المنظومة في

المستقبل يبدو محدداً تحديداً كلياً بقوانين الفيزياء. حتى أن القسم U من مكانيك الكم يتصف بالحتمية القطعية.إلا أن جزء "القفزة الكمومية" R ليس حتمياً، فهو يدخل عنصراً عشوائياً خالصاً في التطور الزمني. لذلك قفزت أذهان الكثيرين فيما مضى إلى احتمال أن يجدوا هنا دوراً للإرادة الحرة، نظراً لأن نشاط الشعور، ربما كان له تأثير مباشر في الطريقة التي يمكن أن تقفز بها منظومة كمومية إفرادية. ولكن إذا كانت R عشوائية فعلاً، فلن تكون هي الأخرى ذات عون كبير فيما لو أردنا أن نحقق شيئاً إيجابياً لصالح الإرادة الحرة.

أما وجهة نظري الخاصة، فعلى الرغم من أنها لم تتكون بعد جيداً في هذا المجال، فهي تفترض أنه لابد من وجود سيرورة ما جديدة (الثقالة الكمومية الصحيحة,CQG، أنظر الفصل الثامن)تقوم بالمهمة عند الحد الفاصل بين الكمومي والكلاسيكي، أي الحد الذي يملّس interpolate (أو يملأ) الثغرات بين U و R (لأن كلاً منهما يُعد الآن تقريبياً)، وأن السيرورة الجديدة لابد أن تحوي عنصراً هو في ***أساسه لا خوارزمي***. مما سيقضي بأن يكون المستقبل ***غير قابل للحساب*** من الحاضر، على الرغم من أنه يمكن أن يتعين به. ولقد حاولت في مناقشتي للأمر في الفصل الخامس أن أكون واضحاً في تمييزي بين قابلية الحساب والحتمية. ويبدو لي أنه ليس هناك ما يمنع من الموافقة الكلية على أن الثقالة الكمومية الصحيحة CQG يمكن أن تكون نظرية حتمية، ولكن ليست قابلة للحساب* (ولنذكر هنا "نموذج اللعبة" غير القابلة للحساب التي تحدثت عنها في الفصل الخامس ص 214).

ويأخذ بعضهم أحياناً بوجهة النظر القائلة أنه حتى مع الحتمية الكلاسيكية (أو U الكمومية) لا توجد حتمية ***فعلية***، لأن الشروط الابتدائية لا يمكن أن تُعرف أبداً معرفة جيدة لكي يكون المستقبل قابلاً للحساب فعلاً. إذ إن أقل تغيير في الشروط الابتدائية يمكن أن يؤدي في بعض الأحيان إلى إختلافات كبيرة جداً في النتيجة النهائية. وهذا ما يحدث مثلاً في ظاهرة تعرف بـ"الشوش" x في منظومة حتمية (كلاسيكية) ـ وخير مثال على ذلك، عدم اليقين في تنبؤات الطقس. إلا أنه يصعب جداً أن نصدق أن هذا النوع من الارتياب الكلاسيكي يمكن أن يكون هو ما يهيّئ لنا (توهمنا) للإرادة الحرة. فالسلوك المستقبلي سيظل محدداً منذ بداية الإنفجار الأعظم تماماً برغم أننا لن نكون قادرين على حسابه (انظر ص 217).

وهذا الاعتراض نفسه يمكن أن يوجه إلى اقتراحي القائل: إن من الجائز أن تكون ***"اللاحسوبية"*** أصيلة في القوانين الديناميكية (التي نفترض حالياً بأنها ذات صفة لا خوارزمية)،

---

* يمكن ان نشير هنا إلى أن هناك مقاربة واحدة على الأقل نحو نظرية الثقالة الكمومية، يبدو أنها قد تتضمن عنصراً من عدم قابلية الحساب (Geroch، وHartle 1987).

x أو الشواش chaos، راجع مجلة "عالم الذرة"، العدد 14، نيسان 1991،"الشوش علم يصف الواقع" إعداد الدكتور فوزي عوض

بدلاً من أن تكون لا حسوبية ناتجة عن افتقارنا إلى المعلومات المتعلقة بشروطها الابتدائية. فالمستقبل قد لايكون قابلاً للحساب من وجهة النظر هذه. ولكنه يظل محدداً بكل دقائقه بالماضي ـ وعلى طول الزمن الراجع إلى الانفجار العظيم. ولكني في الحقيقة لست متعصباً لدرجة الإلحاح على أن CQG يجب أن يكون حتمياً من غير أن يكون قابلاً للحساب. وإنما تقديري هو أن النظرية المبتغاة يجب أن يكون وصفها أكثر رهافة من هذا. وكل ما أنادي به هنا هو أن هذه النظرية يجب أن تضم عناصر لا خوارزمية من نوع أساسي أصيل.

وأود ان أدون قبل نهاية المقطع، ملاحظة عن وجهة نظر بشأن مسألة الحتمية يمكن أن يتبناها المرء، هي أشد تطرفاً من السابقة. وقد سبق لي أن أشرت إليها باسم ***الحتمية القوية*** (Penrose 1987)، وهي تقول إن المسألة ليست مسألة مستقبل يتعين بالماضي، بل إن ***تاريخ الكون بأكمله محدد تبعاً*** لمخطط رياضي دقيق، ولجميع الأزمنة. ومثل وجهة النظر هذه يمكن أن تكون جذابة لمن يميل إلى مطابقة عالم أفلاطون، بطريقة ما، مع العالم الفيزيائي، لأن عالم أفلاطون محدد دفعة واحدة ولجميع الأزمنة من غير أن يكون لديه "إمكانات بديلة" للكون! (وإني لأعجب أحياناً هل أمكن لأينشتين أن يحمل في رأسه مثل هذا المخطط حين كتب "إن ما يشغلني حقاً هو هل كان بإمكان الإله أن يصنع العالم بطريقة أخرى. أو بمعنى آخر، ألم تترك ضرورة البساطة المنطقية شيئاً من الحرية أبداً " (من رسالته إلى إ. ستراوس Ernest Strauss، انظر Kuznetsov 1977ص 285).

تعالوا نعتبر وجهة نظر تختلف عن وجهة نظر الحتمية القوية، ولتكن مثلاً العوالم المتعددة في ميكانيك الكم (انظر الفصل 6 ص 350) فهذه الوجهة لا تقول بوجود تاريخ واحد مفرد للكون يتعين بمخطط رياضي دقيق، بل بوجود كل الأنواع المنوعة من التواريخ المحتملة. ومع ذلك لا يمكن استبعاد مثل ذلك المخطط المحتمل، على الرغم من طبيعته غير المريحة (بالنسبة لي أنا على الأقل) وكثرة مشاكله ونواقصه التي يعرضنا لها.

يبدو لي أنه لو تبنينا فكرة الحتمية القوية من غير أن تكون هناك عوالم متعددة، لما كان هناك مانع على الأرجح من أن يكون المخطط الرياضي الذي يهيمن على بنية الكون لا خوارزمياً[6]، وإلا لكان باستطاعة المرء مبدئياً، أن يحسب ما الذي سيفعله. وعندئذ يستطيع أن "يقرر" شيئاً آخر يختلف عنه كل الإختلاف، الأمر الذي يؤدي إلى تناقض فعلي بين "الإرادة الحرة" والحتمية القوية في النظرية. أما إذا أدخلنا عدم قابلية الحساب في النظرية فإننا نستطيع أن نتخلص عندئذ من هذا التناقض ـ وبرغم ذلك، عليَّ الاعتراف بأني أشعر بشيء من الانزعاج من مثل هذا الحل. وإني لأتوقع شيئاً أكثر رهافة لأجل القواعد (اللاخوارزمية) الراهنة التي تسود الطريقة التي يسير فيها العالم!

المبدأ الإنساني

ما مدى أهمية الشعور بالنسبة للكون بأجمعه؟ وهل يمكن أن يوجد كون من غير ما سكان (مهما كانوا) يشعرون؟ وهل كان الغرض الأساسي من قوانين الفيزياء إتاحة الوجود للحياة الواعية؟ وهل ثمة شيء خاص حول موضعنا المميز في الكون، سواء أفي المكان أم في الزمان؟... تلك هي أنواع الأسئلة التي يوجهها أصحاب المبدأ الذي أصبح يعرف اليوم باسم *المبدأ الإنساني*.

ولهذا المبدأ صيغ عديدة، (انظر Barrow و Tipier 1986) يكتفي أوْضَحُها ــ وهو صيغة مقبولة ـ بتحديد الموضع الزمكاني للحياة الواعية (أو الذكية) في الكون. وهذا ما يعرف بالمبدأ الإنساني الضعيف الذي يمكن استخدامه حجة لتفسير السبب في أن الظروف أتت مواتية وعلى أتم وجه، لكي توجد الحياة الذكية على الأرض في الوقت الحاضر، لأنها لو لم تكن كذلك لما وجدنا أنفسنا هنا الآن، بل في مكان آخر وفي زمن آخر مناسب. ولقد كان لاستخدام هذا المبدأ من قبل ب. كارتر Brandon Carter و ر.ديك Robert Dicke فائدة كبيرة في حل مشكلة كانت قد حيرت الفيزيائيين لعدد كبير من السنوات. وتتعلق هذه المشكلة بعلاقات عددية متنوعة مذهلة كان قد لوحظ أنها تربط بين الثوابت الفيزيائية (مثل ثابت الثقالة وكتلة البروتون وعمر الكون....) ومن جوانبها المحيرة، أن بعض العلاقات لا تصح إلا في العهد الحاضر من تاريخ الأرض، مما بدا معه أننا نعيش في زمن يتفق مع زمن خاص جداً (مع التهاون زيادة أو نقصاً بعدة ملايين السنين!) وقد فسر هذا الاتفاق (أو التزامن) بعدئذ كارتر وديك، بأنه نتيجة إلى أن هذا العهد يلتقي مع زمن وجود ما يعرف بنجوم التعاقب الرئيسي - main sequence stars، كالشمس مثلاً، وأنه، جرياً على ما تقول حجتهم، لن تكون هناك في أي عهد آخر حياة ذكية في مكان ما تقيس الثوابت الفيزيائية المذكورة ــ وهكذا كان لابد لهذا الالتقاء من أن يصح، لا لسبب إلا لأنه ما كانت لتوجد الحياة الذكية حولنا إلا في الزمن الذي صح فيه هذا الالتقاء بين الزمنين فعلاً.

ويذهب المبدأ الإنساني القوي إلى أبعد من ذلك، فلا يُعنى عندئذ فحسب بموضعنا الزمكاني داخل الكون، بل بموضعنا في سلسلة الأكوان اللانهائية الممكنة. وحينذاك يمكننا أن نقترح إجابات عن اسئلة من قبيل لماذا كانت الثوابت الفيزيائية، أو بوجه عام القوانين الفيزيائية، مصممة تصميماً خاصاً لتتمكن الحياة الذكية من الوجود أصلاً في هذا العالم. وستكون الحجة في ذلك أنه لو كانت الثوابت أو القوانين مختلفة عما هي عليه أي اختلاف، لما كنا وُجدنا في هذا الكون الخاص، بل لكنا في كون ما غير هذا! ولكن هذا المبدأ الإنساني القوي له، في رأيي، طبيعة مثيرة للشك بعض الشيء، لذلك يكاد ألا يستعين به النظريون إلا حين لا تكون لديهم نظرية تصلح حقاً لتفسير الوقائع المشاهدة (مثال ذلك: نظريات فيزياء الجسيمات، حيث لا يمكن تفسير كتل الجسيمات. وهم يحاجون بأنه لو كان لهذه الكتل قيم أخرى مختلفة عن

تلك المشاهدة لكانت الحياة مستحيلة، إلى آخر ما هنالك). أما المبدأ الإنساني الضعيف، فيبدو لي من جهة أخرى، غير استثنائي، بشرط أن يكون المرء حذراً جداً فيما يتعلق بطريقة استعماله.

ويستطيع المرء أن يحاول عن طريق استخدام المبدأ الإنساني ـ بإحدى صورتيه القوية أو الضعيفة ـ أن يثبت أنه لما كان وجود الكائنات الواعية التي هي نحن: لابد منه في مكان ما لكي تلاحظ العالم، لذلك كان لا مناص من وجود الشعور أيضاً. فالمرء ليس بحاجة لأن يفترض، كما فعلت أنا، أن القدرة على الشعور، لها ميزة ما اصطفائية! وهذه في رأيي حجة صحيحة فنياً، فيمكن [إذن] لحجة المبدأ الإنساني الضعيف (على الأقل)، أن تقدم لنا سبباً لأن يكون الشعور قد وجد من دون أن يكون قد فضله الاصطفاء الطبيعي. ولكني من جهة أخرى، لا أستطيع أن أصدق أن حجة المبدأ الإنساني هي السبب الحقيقي أو (السبب الوحيد) لتطور الشعور. إذ ثمة سبل أخرى يأتي منها الدليل ليقنعني بأن الشعور يمتلك ميزة اصطفائية قوية، لذلك لا حاجة بنا في اعتقادي إلى الحجة الإنسانية (أي حجة المبدأ الإنساني).

التبليط وأشباه البلورات

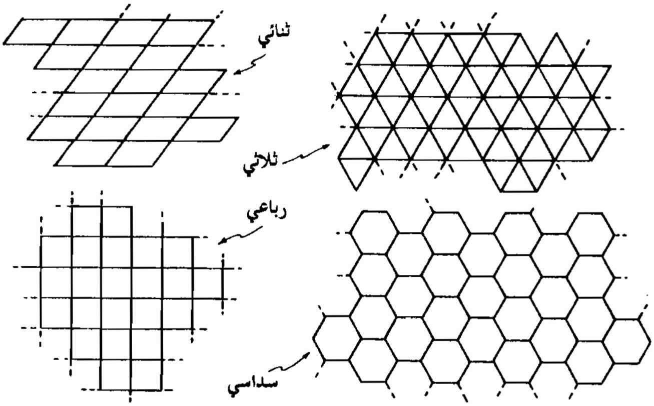
سأبتعد الآن عن جو المقاطع القليلة السابقة وتأملاتها العامة، وسأنظر بدلاً من ذلك في قضية أقرب منها بكثير إلى المجالات العلمية "الملموسة" برغم كونها تأملية أيضاً بعض الشيء. وستبدو هذه القضية في بادئ الأمر مجرد استطراد لا علاقة له بموضوعنا. إلا أن مدلولها سيصبح جلياً في المقطع التالي.

دعونا نتذكر نماذج التبليط **tiling** الممثلة بالشكل 4-12 (ص176). إن هذه النماذج تسترعي الانتباه بعض الشيء لكونها "تكاد" تشذ عن المبرهنة الرياضية القياسية المتعلقة بالشبكات البلورية. إذ تنص المبرهنة على أن التناظرات الدورانية الوحيدة التي تصلح للنماذج البلورية هي الثنائي والثلاثي والرباعي والسداسي[x] ..... ونعني بقولنا نموذجاً بلورياً، كل منظومة من النقاط المنفصلة التي لها تناظر انسحابي. بمعنى أن هناك طريقة لزلق النموذج على نفسه من دون دوران إلى أن ينطبق على نفسه (أي أنه لا يتغير بهذه الحركة الخاصة) فله إذن دور بشكل متوازي أضلاع (انظر الشكل 4-8). وقد عرضنا في الشكل 10-2 أمثلة عن نماذج التبليط ذات التناظرات الدورانية المسموحة. أما نموذجا الشكل 4-12، فيشبهان النموذج المعروض في الشكل 10-3 (الذي يمثل أساساً التبليط المتولد من التوفيق بين بلاطات الشكل 4-11)، فلهما، من جهة ثانية، تناظر انسحابي تقريباً، ولهما تقريباً تناظر خماسي ـ وتعني

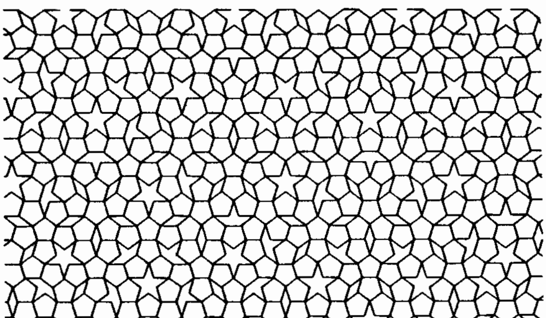
---

[x] بمعنى أن المستوى كله يدور دورة كاملة: (1) بعد تدويره زاوية π مرتين حول مركز أحد متوازيات الأضلاع، (2) بعد تدويره زاوية $2\pi/3$ ثلاث مرات حول مركز أحد المثلثات، (3) بعد تدويره زاوية $\pi/2$ أربع مرات حول مركز أحد المربعات وهكذا ...

"تقريباً" هنا بأن القارئ يمكن أن يجد مثل هذه الحركات للنموذج (حركة انسحابية ثم دورانية على التوالي) فيتحرك النموذج فيها على نفسه إلى أي درجة مرغوبة محددة سلفاً من التوافق الذي يقترب جداً من اكتمال المئة بالمئة. ولا ضرورة لأن نهتم هنا بالمعنى الدقيق لهذا الذي قلناه. لأن الشيء الوحيد الذي سيكون ذا أهمية لنا هو أنه إذا كان لدينا مادة، وكانت ذراتها عند رؤوس أحد النماذج، فستبدو عندئذ على شكل بلورة، مع أنها تبدي تناظراً محظوراً، خماسياً!



الشكل 10-2 : أنواع من التبليط الدوري بتناظرات مختلفة (حيث يؤخذ مركز التناظر في كل حالة مركز إحدى البلاطات)



الشكل 10-3 : تبليط شبه دوري (يتولد أساساً من التوفيق بين بلاطات الشكل 4-11) له تناظر خماسي "مستحيل" من وجهة نظر علم البلورات

وفي كانون الأول /يناير من عام 1984. كان الفيزيائي اليهودي د. شيختمان Dany Shechtman يعمل في المكتب الوطني للقياسات National Bureau of Standards في واشنطن DC، في الولايات المتحدة. فأعلن عن اكتشافه لأحد أطوار خليطة الألومنيوم مع

المنغنيز الذي بدا فعلاً أنه مادة كأنها بلورية - تدعى اليوم شبه بلورية - لها تناظر خماسي. والحقيقة أن هذه المادة شبه البلورية قد أبدت تناظراً في الأبعاد الثلاثة، وليس في المستوى فحسب - فقد كان تناظرها بمجموعه من نوع العشريني الوجوه المحظور (Shechtman et al 1984) - وكان ر. أمان Robert Ammann 1975، قد وجد "عشريني وجوه" ثلاثي الأبعاد يماثل تبليط المستوى من الدرجة الخامسة الذي وجدته أنا [الشكل 4-12]. انظر Gardner 1989). وكانت خلائط شيخمتان مكونة من أشباه بلورات مجهرية ضئيلة فحسب يراوح قطرها حول 10^{-3} ملليمتر. ولكن وجدت فيما بعد مواد شبه بلورية أخرى، ونخص بالذكر منها خليطة الألمنيوم، والليثيوم والنحاس، كانت واحدات تناظراتها العشرينية الوجوه يمكن أن تنمو إلى ما يقرب من ملليمتر حجماً، فكانت مرئية تماماً بالعين المجردة (انظر الشكل 10-4).



الشكل 10-4 :شبه بلورة (هي خليطة من Cu — Li — Al) ذات تناظر بلوري مستحيل ظاهرياً (عشرينيات وجوه). (عن Gayle 1987).

لنلاحظ الآن أن إحدى السمات البارزة في نماذج التبليط شبه البلوري الذي كنت أصفه، هي ان تجمعها هو بالضرورة غير محلي. وهذا يعني أن من الضروري، عند تجميع النماذج، أن نفحص حالة الشكل من حين لآخر على مسافة عدد كبير من "القطع" بعيداً عن نقطة التجميع لكي يكون المرء متأكداً من أنه لم يرتكب خطأً جدياً عند وضع القطع بعضها مع بعض (وربما كان في ذلك وجه شبه مع ما يبدو كأنه "تلمس ذكي"، سبق أن أشرت إليه عند حديثي عن الاصطفاء الطبيعي). وقد كانت السمات من هذا النوع ركناً من أركان جدال كبير يحيط بمسألة بنية أشباه البلورات وبنيتها في وقتنا الراهن، لذلك قد لا يكون من الحكمة أن أحاول تحديد نتائج نهائية إلا بعد أن يوجد حل لبعض هذه القضايا البارزة، ولكن باستطاعة المرء أن يخمن. لذلك سأغامر بإبداء رأيي الخاص، فأقول: إني أعتقد أولاً أن هذه المواد شبه البلورية هي فعلاً ذات تنظيم ممتاز وترتيباتها الذرية قريبة بالأحرى في بنيتها من نماذج التبليط التي سبق لي أن تحدثت عنها. وثانياً، أنا من أنصار الرأي (الأكثر تلمسية) القائل إن هذه القرابة تستدعي أنه من غير الممكن أن يتم تجميعها بصورة معقولة بضم الذرات محلياً ذرة فذرة وفق الصورة

الكلاسيكية لنمو البلورة، بل لابد أن في تجمعها بدلاً من ذلك عاملاً يرجع أساسه إلى اللامحلية في ميكانيك الكم(7).

إن الطريقة التي يتم بها هذا النمو ليست، في تصوري، ذرات تفد إفرادياً لترتبط نفسها بخط نمو يتقدم باستمرار (كما في نمو البلورات الكلاسيكي). بل يجب أن ينظر المرء إلى هذا النمو بدلاً من ذلك بأنه تطور انضمام خطي كمومي مؤلف من ترتيب ذرات يرتبط بعضها ببعض بأشكال عديدة محتملة ومختلفة (بحسب الإجراء الكمومي U). وهذا بالفعل ما يجب أن يحدث (دائماً تقريباً) بحسب ما يفيدنا به ميكانيك الكم ! إذ ليس ثمة شيء واحد يحدث، بل يجب أن تتواجد معاً عدة ترتيبات ذرية بديلة في تراكب انضمام خطي معقد. فمن هذه البدائل المتراكبة المنضمة، ينمو عدد قليل ليصل إلى تجمعات أكبر بكثير من غيرها. ثم عند نقطة معينة، يصل الفرق بين الحقول الثقالية لبعض البدائل إلى مرتبة الغرافيتون الوحيد (أو أي شيء آخر مناسب. انظر الفصل الثامن ص 433). وعند هذه المرحلة سيصبح أحد الترتيبات البديلة متميزاً بكونه الترتيب الفعلي ـ وهذا الترتيب يرجح جداً أنه تراكب أيضاً لعدة تراتيب، ولكنه تراكب مختزل بعض الشيء ـ (وهذا هو الإجراء الكمومي R) ثم إن هذا التجمع المتراكب يستمر في النمو أكثر فأكثر بمرافقة عمليات اختزال إلى ترتيبات أكثر تحديداً إلى أن تتكون شبه بلورة ذات حجم معقول.

وحين تنشد الطبيعة تكويناً بلورياً، تبحث في الحالة الطبيعية عن التكوين ذي الطاقة الأدنى (مفترضين أن درجة حرارة الخلفية صفر). إني أتصور أن شيئاً مشابهاً يحدث في حالة أشباه البلورات، مع فارق وحيد هو أن إيجاد هذه الحالة الثابتة ذات الطاقة الدنيا أصعب بكثير، كما لا يمكن أن يُكتشف أفضل ترتيب للذرات بمجرد إضافة الذرات ذرة فذرة بأمل أن تنفرد كل ذرة بحل مشكلتها الخاصة وحدها للوصول إلى الحد الأدنى للطاقة. إذ علينا أن نحل بدلاً من ذلك مشكلة شاملة يقوم فيها جهد تعاوني بين عدد كبير جداً من الذرات كلها معاً. كما أُلح على أن هذا التعاون يجب أن يتم بحسب الميكانيك الكمومي. والطريقة التي يتحقق بها ذلك، تتم بترتيب الذرات ترتيبات مركبة عديدة مختلفة تتم "محاولتها" في آن واحد بتراكب خطي (وربما بطريقة تشبه بعض الشيء "الحاسوب الكمومي" الذي ذكر في نهاية الفصل التاسع). ويجب أن يتم اختيار الحل المناسب لمشكلة الوصول إلى الحد الأدنى للطاقة حتى وإن كان هذا الحل ليس بالتأكيد هو الأفضل لدى التوصل إلى معيار الغرافيتون الوحيد (أو أي بديل مناسب) ـ وهذا لا يتم على الأرجح إلا حين تتوافر الشروط الفيزيائية بأتم وجه.

ما صلة ذلك كله بمسألة مرونة الدماغ؟

دعوني الآن أحمل هذه التأملات إلى أبعد من ذلك وأتساءل: أمن الممكن أن يكون لها صلة ما بمشكلة الطريقة التي يعمل بها الدماغ؟ فبحسب ما أستطيع أن أرى، تتجلى هذه الصلة على

أرجح تقدير في ظاهرة مرونة الدماغ. فنحن نذكر أن الدماغ لا يشبه الحاسوب في الواقع شبهاً تاماً، وإنما هو أكثر شبهاً بحاسوب يتغير بإستمرار. ويمكن أن تحدث هذه التغيرات، كما يبدو، بأن تتحول المشابك إلى مُنشطة أو غير منشطة تبعاً لتضخم الغصينات الشوكية أو إنكماشها (انظر الفصل التاسع ص 460 والشكل 9-15). وهنا أقحم نفسي وأتحزر بأن ما يتحكم بهذا التضخم أو الانكماش هو شيء مشابه للسيرورة التي تساهم في نمو أشباه البلورات، فلا تتم محاولة إمكانية واحدة فحسب من الترتيبات الممكنة البديلة، بل أعداد كبيرة منها تنضم كلها في تراكب خطي معقد، ثم تبقى هذه البدائل متواجدة معاً، طالما أن آثارها دون مستوي غرافيتون واحد (أو أي مكافئ آخر) (بل لابد أن تتواجد دائماً تقريباً وفقاً لقواعد U في ميكانيك الكم)، وإذا ظلت آثارها دون المستوى المذكور، أمكن عندئذ أن يبدأ إنجاز مجموعة من الحسابات كلها معاً في آن واحد وباتفاق كبير جداً مع مبادئ الحاسوب الكمومي. ولكن يبدو، على الأرجح، ألا تستطيع هذه التراكبات البقاء طويلاً، لأن الإشارات العصبية تولّد حقولاً كهربائية يمكن أن تثير اضطراباً ملموساً في المواد المحيطة (على الرغم من أن الأغمدة (أو الأغلفة) النخاعية يمكن أن تساعد في عزلها عن هذه الحقول). ولكن دعونا نخمن أنه يمكن لمثل هذا التراكب من الحسابات أن يستمر فعلاً مدة تكفي على الأقل لحساب شيء له معنى فعلاً قبل الوصول إلى مستوي غرافيتون واحد (أو ما يكافئه)، فلابد أن النتيجة الناجحة لهذا الحساب هي "الهدف" الذي يحل محل "هدف" الوصول إلى الطاقة الأدنى، البسيط، في نمو أشباه البلورات. ذلك لأن تحقيق هذا الهدف يشبه تحقيق الهدف في نمو شبه البلورة!

لا جدال في أن الشك والغموض يحيطان بهذه التأملات، ولكني أعتقد بأنها تظهر تماثلاً أصيلاً مقبولاً. إذ يتأثر نمو البلورة أو شبه البلورة تأثراً شديداً بنسب تركيز الذرات والأيونات الموجودة في جوارها، وكذلك يمكن للمرء أن ينظر إلى تضخم أسر التغصنات الشوكية أو انكماشها بأنها يمكن أن تتأثر أيضاً بالشدة نفسها بنسب تركيز مختلف مواد النقل العصبي التي يمكن أن تحيط بها (كأن تتأثر بالانفعالات) مهما كانت الترتيبات الذرية التي تنتهي (أو تختزل) إلى واقع شبه بلوري، فهي تتضمن حل مشكلة الوصول إلى الحد الأدنى من الطاقة. وعلى غرار ذلك، كما أخمن، يبدو أن التفكير الذي يطفو على السطح في الدماغ هو ايضاً حل لمشكلة ما، ولكنه الآن ليس بالتحديد حلاً لمشكلة الوصول إلى الحد الأدنى للطاقة فحسب وإنما يتضمن السعي، بوجه عام، إلى هدف طبيعته أعقد من ذلك بكثير، تحدده الرغبات والنوايا المرتبطة هي أيضاً بجوانب الدماغ الحاسبية بقدارته: ففي تقديري أن تأثير التفكير الواعي مرتبط ارتباطاً قوياً بتفكيك resolvig out البدائل التي كانت سابقاً في حالة تراكب خطي. وهذا كله متوقف على

الفيزياء المجهولة السائدة في الحد الفاصل بين U و R والتي تتعلق، كما أنادي، بنظرية في الثقالة الكمومية لا تزال قيد الاكتشاف - CQG!

ترى أمن الممكن أن يكون هذا النشاط الفيزيائي ذا طبيعة لا خوارزمية؟ لقد رأينا في الفصل الرابع أن مسألة التبليط العامة هي مسألة ليس لها حل خوارزمي. فيمكن للمرء أن يتصور بأنه من الممكن أن تشترك مسائل تركيب الذرات في هذه الخاصة اللاخوارزمية. فإذا أمكن حل هذه المسائل مبدئياً بنوع من الوسائل التي سبق لي أن ألمحت إليها، عندئذ تتوافر لدينا إمكانية لوجود عنصر لا خوارزمي في نمط النشاط الدماغي الذي أفكر فيه. ومع ذلك لكي يكون هذا النشاط، على هذا النحو، نحتاج إلى شيء لا خوارزمي في CQG. وفي ذلك حقاً قدر كبير من التخمين، ولكن لابد لنا في النهاية، كما يبدو لي، من **شيء** ذي طبيعة لا خوارزمية، نظراً للحجج التي ذُكرت أعلاه.

ترى بأي سرعة يمكن ان تحدث هذه التغيرات في الرابطة الدماغية؟ يبدو أن هذه القضية هي إلى حد ما موضع خلاف بين علماء فيزيولوجية الأعصاب، ولكن لما كانت الذكريات الدائمة يمكن أن تختزن خلال أجزاء قليلة من الثانية، فمن المعقول أن تحدث هذه التغييرات في الروابط في هذا الزمن القصير. بل إني بحاجة لمثل هذه السرعة فعلاً لكي يكون لأفكاري الخاصة نصيب من الصحة.

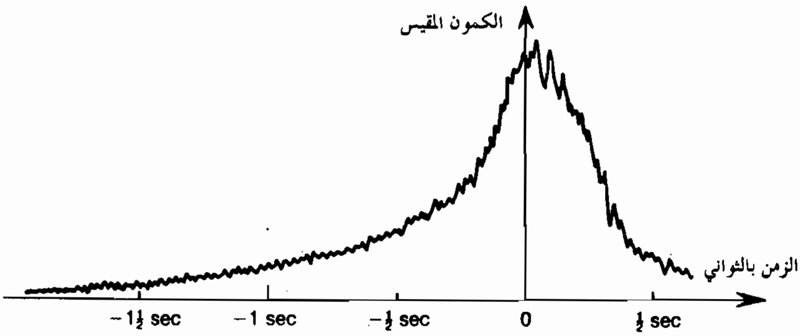
المهلة الزمنية لتصرف الشعور

أود أن أصف فيما يلي تجربتين (أوردهما Harth 1982) كانتا قد أجريتا على أشخاص آدميين. إذ يبدو أن هناك نتائج مهمة إلى حد ما تترتب عليهما، كما لهما علاقة بالزمن الذي يحتاجه الشعور لكي يؤثر ويتأثر. فأولاهما تتعلق بدور الشعور الفعال، والثانية بدوره السلبي. والنتائج المترتبة عليهما إذا اعتبرتا معاً، مدهشة أكثر حتى من كل منهما.

أجرى الأولى كورنوبر H.H.Kornhuber ومعاونوه في ألمانيا عام 1976. (Deecke و Grotzinger و Kornhuber: 1976). فقد تطوع عدد من الأشخاص لأن تؤخذ إشارات كهربائية من نقطة ما على رؤوسهم (أي مخططات لموجات الدماغ الكهربائية، سنشير إليها اختصاراً EEG من electro encephalo grams) وطلب منهم أن يثنوا إصبع السبابة من اليد اليمنى فجأة وفي أزمنة مختلفة وبمحض اختيارهم تماماً. وكانت الفكرة في ذلك هي أن التسجيلات EEG قد تدل على شيء من النشاط العقلي الذي يجري داخل الجمجمة ويساهم في اتخاذ القرار الفعلي الواعي بثني الاصبع. وكان لابد للحصول من المخططات على إشارة ذات معنى، من أن يؤخذ متوسط المخططات بعد تكرار التجربة من جديد عدة مرات. وبرغم ذلك لن تكون الإشارة الناتجة محددة (أو دقيقة) جداً. إلا أن ما وجد كان مهماً، أعني أن هناك تعاظماً متدرجاً للطاقة (الكمون) الكهربائية المسجلة على

مدة ثانية كاملة، أو ربما حتى ثانية ونصف قبل أن يُثنى الاصبع فعلاً، مما بدا أنه يدل على ان سيرورة القرار الواعي تستغرق أكثر من ثانية لكي تنفذ العمل. فهذه المدة بخلاف المدة الأقصر بكثير التي يحتاجها الشعور لكي يرتكس لإشارة خارجية فيما لو كانت صيغة الرد مرسومة سلفاً. فلو كان ثني الإصبع مثلاً رداً على إشارة ضوئية بدلاً من أن يكون "بإرادة حرة" لكان زمن الفعل في هذه الحالة نحواً من خُمس الثانية عادة، وهذا أسرع بخمس مرات من التصرف المقرر الذي أظهرته بيانات كورنوبر (انظر الشكل 10-5).

أما التجربة الثانية فقد اجراها ب.لايبت Benjamin Libet من جامعة كاليفورنيا بالتعاون مع (ب. فاينشتاين Bertram Feinstein) من معهد جبل صهيون لعلم الأعصاب في سان فرانسيسكو (1979 Libet et al.). وقد اختبروا فيها أشخاصاً كان يجب أن تُجري لهم جراحة في الدماغ لسبب من الأسباب لا صلة له بالتجربة. وقد قبل المرضى أن توضع لهم مساري في بعض النقاط من الدماغ في منطقة قشرة الحس الجسدي. وكانت النتائج الأساسية لهذه التجارب أن التأثير في جلد المرضى كان يستغرق نصف ثانية تقريباً لكي يصل إلى وعي المرضى ويشعروا به، على الرغم من أن الدماغ نفسه يكون قد تلقى إشارة المنبه في غضون ما يقرب من جزء من مئة من الثانية فحسب. وأن بإمكانه أن ينجز الرد "المنعكس" المبرمج سلفاً على هذا المنبه (راجع أعلاه) في ما يقرب من عشر ثانية (الشكل 10-6). نضيف إلى ذلك أنه على الرغم من التأخر نصف ثانية قبل أن يصل التنبيه إلى وعي المرضى، كان لدى هؤلاء أنفسهم شعور ذاتي بأنه لم يحدث لديهم أي تأخير في الاطلاع على المنبه (وقد تضمنت بعض تجارب لايبت تنبيهاً للمهاد. راجع ص 448 وكانت نتائجها مماثلة للتأثير في قشرة الإحساس الجسدي)



الشكل 10-5 : تجربة كورنوبر: يبدو من الشكل أن قرار ثني الإصبع قد اتخذ في الزمن 0، ومع ذلك يوحي الجزء الأول من الاشارة (بعد أخذ وسطيها من تجارب عديدة) بمعرفة مسبقة لنية ثني الإصبع.

إن قشرة الدماغ الخاصة بالإحساس الجسدي، كما نذكر، هي منطقة المخ التي تدخل فيها الإشارات الحسية. لذلك يبدو التنبيه الكهربائي لإحدى نقاط قشرة الإحساس الجسدي الموافقة لنقطة معينة من جلد الشخص كأن هناك شيئاً قد مسه في هذه النقطة. وبرغم ذلك، فقد تبين أنه إذا كانت مدة هذا التنبيه الكهربائي قصيرة جداً ـ أقل ممايقرب من نصف ثانية ــ فعندئذ لن يدري الشخص بأي إحساس على الإطلاق، أي بخلاف التنبيه المباشر لنقطة من الجلد نفسه، لأنه يمكن الإحساس باللمسة الخاطفة على الجلد.

لنفرض الآن أن الجلد قد نُمِس في البدء، ثم نبهت النقطة الموافقة من القشرة الدماغية كهربائياً، فما الذي يشعر به المريض؟ إذا بدأ التنبيه الكهربائي بعد ربع ثانية تقريباً من لمس الجلد، عندئذ لن يشعر المريض أبداً بلمس الجلد. وقد عرف هذا الأثر باسم الحجب الرجعي (الشكل 10-6-d). إذ يعمل تنبيه القشرة بطريقة أو بأخرى على إخفاء شعور الإحساس باللمس العادي للجلد. فيمكن لحادث متأخر أن يمنع (أو "يخفي") الإدراك الواعي بشرط أن يحدث هذا الحادث في غضون نصف ثانية تقريباً. وهذا بذاته دليل على أن الإدراك الواعي لمثل هذا الإحساس يحدث في غضون فترة قريبة من نصف ثانية بعد الحادث الفعلي الذي ولد هذا الإحساس.

ولكن الإنسان كما يبدو لا "يدري" بتأخر الإدراك هذه المدة الطويلة. لذلك يمكن أن نتصور لفهم هذا الاكتشاف المثير أن "زمن" عمليات الإدراك كلها تتأخر فعلياً بما يقرب من نصف ثانية عن الزمن الفعلي [أي زمن حدوث التنبيه] ـ فكأن ساعتنا الداخلية "متأخرة" ببساطة بنصف ثانية أو نحو ذلك. والزمن الذي يدرك به أحدنا أن حادثاً قد تم، سيأتي إذاً متأخراً دوماً بنصف ثانية بعد حدوث الحادث الفعلي. وهذا ما يعطينا صورة منسقة عن انطباعاتنا الحسية وإن كانت متأخرة تأخراً مزعجاً.

وثمة شيء ربما كان من طبيعة هذه النتيجة نفسها كان قد تحقق في قسم ثان من تجربة لايبت. إذ باشر لايبت بتنبيه القشرة كهربائياً، واستمر في هذا التنبيه مدة أطول بكثير من نصف ثانية. ثم لمس الجلد في اثناء استمرار هذا التنبيه، ولكن بعد مرور أقل من نصف ثانية على بدئه.فأدرك المريض تنبيه القشرة ولمس الجلد معاً، ولكن كلاً منهما على حدة، كما تبين بوضوح أيهما كان هذا وأيهما كان ذاك. ولكن حين سئل أي التنبيهين حدث أولاً، أجاب بأنه لمس الجلد، على الرغم من أن تنبيه القشرة كان قد بدأ أولاً في الحقيقة وهكذا يبدو أن المريض ينسب إدراك لمس الجلد إلى وقت سابق بما يقرب من نصف ثانية (انظر الشكل 10-6). إلا أن هذا "الخطأ" كما يبدو، ليس مجرد خطأ شامل نرتكبه في سائر الزمن الذي ندركه داخلياً، وإنما هو إعادة تركيب أكثر رهافة لإدراك الحوادث في الزمن، بدليل أن تنبيه القشرة، الذي قبلنا نهائياً بأن إدراكه يتأخر، (ولكن ليس أكثر من نصف ثانية من بدئه)، لا ينسب بنفس الطريقة إلى زمن سابق.



الشكل 10-6 : تجربة لايبت (a) يبدو أن تنبيه الجلد يتم إدراكه في الزمن الراهن تقريباً لحوث التنبيه. (b) إن تنبيه القشرة لأقل من نصف ثانية لا يمكن إدراكه (c) إن تنبيه القشرة لأكثر من نصف ثانية يمكن إدراكه بعد مضي نصف ثانية (d) يمكن لهذا التنبيه على القشرة أن "يعود فيحجب" تنبيهاً جلدياً سابقاً، مما يشير إلى أن وعي الشخص لتنبيه الجلد لم يكن قد تحقق فعلاً خلال زمن تنبيه القشرة (e) إذا طبق تنبيه الجلد بعد زمن قصير من هذا التنبيه للقشرة، عندئذ "يرتد" إدراك الجلد إلى زمن سابق وأما إدراك القشرة فلا.

يبدو أننا نستنتج من أولى التجربتين المذكورتين أعلاه أن التصرف الواعي يحتاج إلى ما يقرب من ثانية إلى ثانية ونصف قبل أن يكون قابلاً للتنفيذ. في حين أنه يبدو من التجربة الثانية أن الشعور بحادث ما خارجي لا يتم إلا بعدما يقرب من نصف ثانية من وقوع الحادث. وعلى هذا دعونا نتخيل ما الذي يحدث حين يرد شخص على طارئ خارجي غير متوقع، ولنفرض أن الرد شيء يتطلب التأمل الواعي للحظة من الزمن. يتضح لنا، اعتماداً على اكتشافات لايبت، أنه يجب أن ينقضي نصف ثانية قبل أن يصبح الشعور جاهزاً لدوره. وبحسب ما تقتضيه عندئذ بيانات كورنوبر،

لابد من مرور أكثر من ثانية كاملة قبل أن يبدأ الرد "المرغوب" بالحدوث. فالسيرورة الكاملة من المُدخل الحسي إلى المُخرج الحركي، تحتاج فيما يبدو لما يقرب من ثانيتين! والنتيجة الظاهرة لهاتين التجربتين معاً هي أن الشعور لا يمكن حتى أن يُدعى إطلاقاً للقيام بدوره في الرد على حادث خارجي إذا كان هذا الحادث يتطلب منه الرد في غضون ثانيتين أو نحو ذلك.

دور الزمن الغريب في الإدراك الواعي

هل يمكن أن نقبل هذه التجارب على عواهنها؟ إذا فعلنا ذلك نبدو كأننا إنسقنا إلى الإستنتاج بأننا، حين ننفذ عملاً يتطلب أقل من ثانية أو ثانيتين، نتصرف عندئذ كلياً تصرف "إنسان آلي" لتهيئة رد ما خلال هذه المدة. إذ لا شك بأن الشعور بطيء التصرف إذا ما قورن بآليات أخرى من آليات الجملة العصبية. فقد لاحظت أنا نفسي مناسبات من هذا القبيل. فحين أراقب وأنا عاجز [عن التصرف بسرعة] كيف تغلق يدي باب السيارة بعد لحظة من ملاحظتي وجود شيء في داخلها كنت أود استرداده، تتصرف أوامري الإرادية لإيقاف حركة يدي ببطء مزعج ـ أبطأ حتى من أن أوقف إغلاق الباب. ولكن هل يستغرق ذلك ثانية كاملة أم ثانيتين؟ يبدو لي من غير المرجح أن يستغرق الأمر مثل هذا الوقت الطويل. وإنما من الجائز طبعاً أن يكون وعيي الشاعر بوجود الشيء داخل السيارة إضافة إلى "رغبتي الحرة" المتخيلة في التمكن من إيقاف يدي، قد خطرا لي أيضاً بعد كلا الحادثين. بل ربما كان الشعور في نهاية الأمر مجرد شاهد لا يمارس شيئاً سوى عملية استعادة الحادث بأكملها. واستناداً إلى المكتشفات السابقة، فقد لا يتاح بالمثل، تبعاً للظواهر، وقت للشعور لأن يقوم بأي دور على الإطلاق، كما هو الحال مثلاً عندما يرد أحد كرة المضرب إلى الخصم ـ ومن باب أولى رد كرة الطاولة. لاشك أن الخبراء في هذه الأعمال يملكون كل أسس الردود فيها وتكون مبرمجة بصورة ممتازة في جهاز التحكم المخيخي. أما أن الشعور يجب ألاّ يقوم بأي دور على الإطلاق في القرار الذي يتخذ بشأن الرمية التي يجب أن يلعبها في حينه، فهذا أمر أجد بعض الصعوبة في تصديقه. لا شك أن هناك عملية انتقاء في تقدير ما يمكن للخصم أن يفعله، كما يوجد العديد من الردود المبرمجة سلفاً والتي يمكن أن تصلح لكل تصرف محتمل من الخصم، ولكن يبدو لي أن ذلك غير مجدٍ وأن غياب مساهمة الشعور في حينه غياباً كاملاً، أمر أجد صعوبة في التسليم به. وقد تكون ملاحظاتي هذه أكثر ملاءمة حتى فيما يتعلق بمحادثة عادية. ففي هذه الحالة أيضاً يمكن للإنسان أن يتنبأ بما قد يقول الآخر، ولكن برغم ذلك، لابد أنه سيجد غالباً في ملاحظاته أموراً غير متوقعة، وإلا لكانت كلها غير ضرورية. ففي الطريقة التي نتحادث بها عادة، لا يستغرق الرد حتماً على شخص آخر زمناً يبلغ ثانيتين.

بل ربما كان في تجربة كورنوبر سبب يدعونا إلى الشك في أنها تبرهن [حقاً] على أن الشعور يحتاج فعلاً إلى ثانية ونصف لكي يتصرف: ففي حين أن ***معدل*** مرات عقد النية على ثني الإصبع المسجلة على مخططات EEG كانت له حقاً إشارة تظهر ذلك في وقت مبكر عن ثني الإصبع، فقد

كان من الجائز ألا تكون هناك نية لثني الإصبع في وقت مبكر جداً إلا في بعض الحالات فقط ـ وعندئذ كان من الممكن لهذه النية الواعية ألاتتحقق في أغلب الأحيان ـ في حين أنه، في كثير من الحالات الأخرى يحدث النشاط الواعي في وقت أقرب بكثير إلى ثني الإصبع من الحالات السابقة. (هناك في الحقيقة بعض الاكتشافات التجريبية اللاحقة، (انظر Libet 1987، 1989)، تؤدي إلى تفسير يختلف عن تفسيرات كورنوبر. إلا أن هذا لا يؤثر في الاستنتاجات المتعلقة بتوقيت الشعور التي ذكرناها).

وبرغم ذلك دعونا نسلم حالياً بأن نتيجتي التجربتين سليمتان فعلاً. وعندئذ أود أن أبدي إقتراحاً مفاجئاً فيما يتصل بهذا الأمر فأنبه أنه من الجائز عملياً أن نمنى بفشل ذريع إذا نحن طبقنا قواعد الفيزياء العادية المعروفة على الزمن عندما يتعلق الأمر بالشعور! إذ إنه في جميع الأحوال ثمة شيء غريب جداً بالفعل في الطريقة التي يتدخل بها الزمن عملياً في إدراكاتنا الواعية. فأنا أعتقد بأنه، عند محاولة وضع الادراكات في إطار مرتب زمنياً بالطريقة التقليدية، عندئذ قد يكون ما يلزمنا هو مفهوم مختلف جداً. لأن الشعور في النهاية هو الظاهرة الوحيدة التي نعرف منها أن الزمن، تبعاً لها، ينبغي أن يجري، أما الطريقة التي يعامل بها الزمن في الفيزياء الحديثة فلا تختلف عن الطريقة التي يعامل بها المكان*. لأن زمان الوصف الفيزيائي لا يجري في الحقيقة على الاطلاق، وكل ما لدينا هناك هو بالتحديد "زمكان" ثابت سكوني المظهر تستقر فيه حوادث كوننا. أما تبعاً لمدركاتنا، فالزمن يجري فعلاً (انظر الفصل السابع). وبرغم ذلك يوجد في هذا الزمن بتقديري شيء وهمي، لأن زمن إدراكاتنا لا يجري أيضاً "في الحقيقة"، تماماً بذات الطريقة المتقدمة للأمام خطياً التي ندرك بها أنه يجري (مهما كان ممكناً أن يعني ذلك). حتى أن الترتيب الذي يبدو أننا ندركه، هو، كما أؤكد، شيء نفرضه على إدراكاتنا لكي نجعل لها معنى في سياق تقدم الزمن المطرد المنتظم للحقيقة الفيزيائية الخارجية x.

قد يجد بعض الناس "خللاً" فلسفياً عظيماً في ملاحظاتنا السابقة. ولا شك أنهم على حق في هذه الاتهامات. إذ كيف يكون المرء "مخطئاً" فيما يدركه فعلاً † ؟ لا شك أن مدركاته الفعلية هي بالتعريف الأشياء التي يعيها مباشرة بالضبط، فهو إذن لا يمكن أن يكون "مخطئاً" بشأنها. وبرغم

---

* قد يكون هذا التناظر بين المكان والزمان، مدهشاً أكثر في حالة الزمكان ذي البعدين. لأن معادلات الفيزياء في الزمكان ذي البعدين متناظرة أساساً لمبادلة المكان بالزمان ـ وبرغم ذلك لا أحد يقول إن المكان "يجري" في الفيزياء ذات البعدين. ويصعب علينا أن نصدق أن اللاتناظر وحده بين عدد أبعاد المكان (3) وعدد أبعاد الزمان (1) الذي صادف أنه في زمكاننا، هو ما يجعل الزمن "يجري فعلاً" في تجاربنا على العالم الفيزيائي الذي نعرفه.

x أو باختصار إن الزمن الفيزيائي مختلف جداً عن زمن الشعور. الأمر الذي يذكرنا ببرغسون الذي يقول إن الزمن الحقيقي هو زمن الشعور، فهو الذي يعطينا هذا الاعتقاد بأن الزمن يجري أما الزمن الفيزيائي فهو مكان.

† وإلا لكان كل نتاجنا الفكري خطأ.

ذلك، أعتقد بأننا على الأرجح "مخطئون" بالفعل فيما يتصل بإدراكنا لتقدم الزمن، وبان هناك دليلاً يدعم هذا الاعتقاد (على الرغم من عيوبي في استخدام اللغة العادية في وصف ذلك. أنظر Churchland 1984).

ولدينا مثال رائع على ذلك (ص495) هو مقدرة موتسارت على "الالمام بلمحة واحدة" بكامل مؤلّف موسيقي " على الرغم من أنه قد يكون طويلاً". ولابد أن يفترض المرء بعد سماعه لوصف موتسارت، أن هذه اللمحة تشمل أساسيات المؤلّف الكامل، على الرغم من أن الامتداد الزمني الخارجي الفعلي لعملية الادراك الواعية هذه، لا يمكن بلغة الفيزياء العادية مقارنته إطلاقاً بالزمن الذي يمكن أن يستغرقه عزف هذا العمل. ويمكن للمرء أن يتخيل أن إدراك موتسارت كان من الممكن أن يأخذ شكلاً مختلفاً كل الاختلاف، كأن يكون موزعاً في المكان كمشهد مرئي، أو كقطعة موسيقية كاملة مكتوبة بالتفصيل. ولكن حتى القطعة الموسيقية تحتاج وقتاً طويلاً لقراءتها بإمعان ـ وأشك كثيراً في أنه كان من الممكن أن يأخذ إدراك موتسارت لمؤلفاته، مبدئياً، هذا الشكل (وإلا لقال ذلك حتماً). ويبدو أن المشهد المرئي هو أقرب الأمور إلى وصفه. ولكن (كما هو الحال في أكثر التصورات الرياضية شيوعاً، وهي الأكثر إلفة بالنسبة لي شخصياً) أشك كثيراً في أن يكون في الأمر شيء يشبه ترجمة الموسيقى مباشرة إلى رموز مرئية. والأرجح من ذلك بكثير، كما يبدو لي، هو أن أفضل تفسير "للمحة" موتسارت يجب أن يؤخذ في الحقيقة من وجهة نظر موسيقية بحتة مع ما تتضمنه طبعاً من المعاني الزمنية التي يمكن أن يحملها سماع قطعة موسيقية (أو عزفها). لأن الموسيقى تتألف من أصوات تستغرق وقتاً محدداً لعزفها هو الوقت الذي يجيز في وصف موتسارت الحقيقي "......أن يجعلني خيالي أسمعها".

لنستمع إلى المتتالية الرباعية في القسم الأخير من مقطوعة جوهان سباستيان باخ "فن المتتالية". لا أحد ممن يتعاطفون مع موسيقى باخ يمكن أن يقاوم تأثره عندما تتوقف الموسيقى بعد عشر دقائق من العزف، أي بعد دخول اللحن الثالث مباشرة. إذ يبدو العمل بكامله [وكأنه] لا يزال بصورة ما موجوداً، ولكنه تلاشى منا الآن في لحظة واحدة. ولقد مات باخ قبل أن يتمكن من إتمام عمله، لذلك تتوقف قطعته الموسيقية عند هذه النقطة من دون أن يترك ملاحظة مكتوبة حول كيف كان ينوي متابعتها. وبرغم ذلك تبدأ القطعة بثقة وتمكّن لا يمكن للمرء أن يتخيل معهما أن باخ لم يكن يستوعب أساسيات العمل بأكمله في رأسه دفعة واحدة، فهل كان بحاجة لأن يعزفه كله بأكمله لنفسه في عقله بسرعة العزف العادية فيؤديه مرة تلو أخرى ثم أخرى، مادامت مختلف التحسينات تخطر له؟ أنا لا أستطيع أن أتصور أنه كان يتبع هذه الطريقة، بل لابد أنه كان بصورة ما مثل موتسارت يستطيع أن يتصور العمل بكامله بكل تعقيده الفائق ومضامينه الفنية التي تتطلبها كتابة المتتالية، فيستحضرها في ذهنه كلها معاً. على أن الطبيعة الزمنية في الموسيقى هي إحدى مقوماتها الأساسية. فكيف يمكن لهذه الموسيقى أن تبقى موسيقى إذا لم تعزف في "زمن حقيقي"؟

ويمكن أن يقدم لنا تصور رواية أو قصة مشكلة مماثلة (على الرغم من أنه في الظاهر أقل إشكالية). وقد يحتاج المرء في فهم حياة فرد بأكملها لأن يتأمل حوادث مختلفة يبدو أن تقديرها الخاص يتطلب منه إستعادة [حدوثها] عقلياً في "زمن حقيقي"، وبرغم ذلك يبدو هذا غير ضروري وحتى انطباعاتنا عن ذكريات تجاربنا الخاصة التي تستغرق زمناً، تبدو بأنها مضغوطة بصورة ما، حتى ليمكن لأحدنا أن يحياها افتراضياً في لحظة لملمتها.

وقد تكون هناك أوجه شبه قوية بين التأليف الموسيقي والتفكير الرياضي. فقد يفترض بعض الناس أن تصور البرهان الرياضي يتم على صورة تتابع منطقي تبنى فيه كل مرحلة على المراحل السابقة لها. وبرغم ذلك، يندر على الأرجح أن يسير حقاً تصور إثبات جديد على هذا النهج، بل يأتي التصور على هيئة حل كامل له محتوى تصوري غامض ظاهرياً، وضروري لبناء الإثبات الرياضي، وليس لهذا التصور صلة كبيرة بالزمن الذي قد يستغرقه عند تقديمه على صورة برهان متسلسل قيم بكل معنى الكلمة.

لنفرض إذاً أننا قبلنا بأن التوقيت والتعاقب الزمنيين الخاصين بالشعور لا يتفقان مع ذينك الخاصين بالواقع الفيزيائي الخارجي. ترى أفلسنا نجازف بذلك في خطر الانزلاق في مفارقة؟ ثم لنفرض أن هناك أيضاً، وبصورة مبهمة، غاية ترتجى من نتائج الشعور، بصورة أن انطباعاً في المستقبل يمكن أن يؤثر في فعل (أو تصرف) مضى. إن هذا الإفتراض سيؤدي بنا حتماً إلى تناقض مماثل لتلك النتائج الظاهرة التناقض التي ترتبت علىانتشار الإشارات بسرعة أكبر من سرعة الضوء التي ذكرناها في مناقشتنا الواردة بالقرب من نهاية الفصل الخامس (راجع ص 259) — وأعلنا في حينه بحق أنها غير واردة - ولكنني أود أن أقول إن هذا الافتراض هنا يمكن ألا يتضمن أية مفارقة، وذلك لطبيعة العمل ذاتها الذي أسعى أنا هنا للتأكيد على أن الشعور يقوم به. إذ عرضت فيما نذكر رأياً يقول إن الشعور في جوهره هو "الرؤية" التي تطلعنا على حقيقة ضرورية والتي يمكن أن تمثل نوعاً من الاتصال الفعلي بعالم أفلاطون للمفاهيم الرياضية المثالية. ونذكر أن عالم أفلاطون نفسه ليس له زمن، وأن إدراكنا للحقيقة الأفلاطونية لا يحمل إلينا إعلاماً فعلياً - لأن معنى "الإعلام"، فنياً، هو ما يمكن نقله برسالة - فليس ثمة تناقض فعلي نتورط فيه إذاً حتى ولو انتشر مثل هذا الإدراك الشعوري (الواعي) رجوعاً في الزمن الماضي.

ولكن حتى مع التسليم بأن للشعور نفسه مثل هذه العلاقة الغريبة مع الزمن - وأنه يمثل، بمعنى ما، اتصالاً بين العالم الفيزيائي الخارجي وشيء لا زمن له [سنتساءل أيضاً]: كيف ينسجم ذلك مع أداء الدماغ المادي لعمله المحدد فيزيائياً والمرتب زمنياً؟ يبدو ثانية أننا أودعنا شعوراً ليس له سوى دور "المشاهد" فحسب، هذا إن لم نشأ العبث بتعاقب القوانين الفيزيائية العادي. وبرغم ذلك، إنني مصر على وجود نوع من الدور الفعال للشعور، بل ودور قوي فعلاً، متميز بفضيلة اصطفائية قوية. أما الرد على المشكلة التي طرحتها، فيعتمد في اعتقادي على الطريقة الغريبة التي لا بد أن الثقالة الكمومية الصحيحة CQG تعمل بها لإنهاء التعارض القائم بين عمليتي ميكانيك الكم U و R (راجع ص 417 و 432).

وهنا، دعونا نتذكر المسائل التي تصادفها العملية R مع الزمن لكـي تتسـق مـع النسبية (الخاصـة) (الفصلان السادس والثامن ص 340 و 438) إذ يبدو أن هذه العملية لا معنى لهـا إطلاقاً عندمـا نعـبر عنها بلغة الزمكان العادية. بالفعل: لنأخذ إحـدى الحـالات الكمومية لثنـائي مـن الجسيمات. فهـذه الحالة عادة لا بد أن تكون حالة ترابط (أعني أنها ليسـت مـن الشـكل البسيط $|\psi\rangle|\chi\rangle$ حيـث تصف كل مـن $|\psi\rangle$ و $|\chi\rangle$ جسيماً واحـداً فحسـب، بـل هـي علـى صـورة مجمـوع مـن قبيـل ($|\psi\rangle|\chi\rangle + |\alpha\rangle|\beta\rangle + \ldots + |\rho\rangle|\sigma\rangle$).لذلك ستؤثر مراقبة أحد الجسـيمين في الآخر بطريقة لا محلية لا يمكن وصفها بلغة الزمكان العاديـة وصفـاً يتسـق مـع النسـبية الخاصـة (وذلك تبعاً لـ EPR، أي مفعول أينشتين ـــ بودولسـكي ـــ روزن). ولابـد أن لهـذه المفعـولات اللامحلية دوراً ضمنياً في التماثل الذي عرضتـه بـين شـبه البلـورة وتضخـم الغصينـات الشـوكية وانكماشها.

فأنا أؤوِّل "المراقبة" هنا بأنها تضخيم لنشاط كل جسيم مراقَب (بفتح القاف) إلى أن يصل التضخم إلى شيء من قبيل معيار "الغرافيتون الواحد" الذي تحدده الـ CQG. ولكـن " المراقبـة" هي، بتعبير "تقليدي" شيء أكثر غموضاً بكثير، ويصعب علينا أن نرى كيـف يمكـن للمـرء أن يبدأ بتطوير وصف كمومي ـ نظري لأداء الدماغ لعمله، بينمـا يكـون مـن الممكـن كذلـك أن يتعين عليه النظر إلى الدماغ بأنه "يراقب نفسه" طيلة الوقت.

ففي رأيي الخاص أن الثقالة الكمومية الصحيحة CQG ستوفر لنا، من جهة أخـرى، نظريـة فيزيائية موضوعية في اختزال متجهة الحالة (R) لن تكون مقيدة بالاعتمـاد علـى أي فكـرة عـن الشعور. ونحن طبعاً لا نزال نفتقر إلى مثل هذه النظرية، إلا أن اكتشافها لن تعيقـه علـى الأقـل المشاكل العميقة المتعلقة بتقرير ماهو الشعور فعلاً!

وفي تصوري أنه إذا ما اكتشفت هذه النظرية (أي CQG) فعلاً، يصبح مـن الممكـن عندئـذ أن نشرح بدلالتها ظـاهرة الشـعور. فأنـا أعتقـد في واقـع الأمـر أن الخـواص المأمولـة مـن هـذه النظريـة، سـتكون إذا مـا ظهـرت، أقـل صلـة بـالوصف التقليـدي للزمكـان حتـى مـن ظـاهرة الجسيمين المحيرة التي أعلنها EPR والمشار إليها أعلاه. وإذا كان تفسـير ظـاهرة الشـعور مرتبطـاً فعلاً، كما أقترح، بهذا المعيار الثقالي الكمومي، الافتراضي، فعندئذ لن يتلاءم الشعور نفسه مـع أوصافنا التقليدية الحالية للزمكان إلا بصعوبة!

خلاصة القول، إنها نظرة طفل

لقد قدمت في هذا الكتاب حججاً عديدة، غايتها إثبـات استحالة الأخـذ بوجهـة النظر ـ الـتي تهيمن كما يبدو أكثر ما تهيمن في التفكير المتفلسف ـ والتي تقول إن تفكيرنـا (في أساسـه) أشـبه مـا يكون بأداء حاسوب معقد جداً لعمله. وقد تبنيت هنـا مصطلـح سـيرل Searl (الذكـاء الاصطنـاعي القوي)، وبخاصة حين ذكرت صراحة فرضيته في أن مجرد تشغيل خوارزمـي معـين، يمكـن أن يبعـث

الوعي الشعوري، كما استخدمت تعابير أخرى أحياناً مثل "الوظيفية Functionalism" في مناسبات أقل تحديداً إلى حد ما.

ولا أستبعد أن يكون بعض القراء قد نظروا، منذ البدء، إلى من "يدعم الذكاء الاصطناعي القوي" بأنه ربما كان رجلاً تافهاً! إذ، أليس "جلياً" بأن الحساب وحده لا يمكن أن يبعث السرور أو الألم، وبأنه لا يمكن أن يدرك الشعر أو جمال السماء في المساء أو سحر الموسيقى، وبأنه لا يستطيع أن يأمل أو يحب أو يكره، أو ييأس أو تكون له غاية أصيلة خاصة به؟ إلا أن العلم كما يبدو، قد جرنا إلى التسليم بأننا جميعاً مجرد أجزاء صغيرة من عالم تهيمن عليه بكامل تفصيلاته قوانين رياضية دقيقة جداً (حتى ولو كان من الجائز لهذه القوانين أن تكون في النهاية مجرد قوانين احتمالية) وعقولنا ذاتها، التي يبدو أنها تتحكم في جميع أفعالنا، تسير أيضاً وفقاً لهذه القوانين الدقيقة نفسها. وهكذا انبثقت تلك الصورة القائلة إن هذا النشاط الفيزيائي الدقيق كله ليس في الحقيقة أكثر من إجراء حسابات كثيرة ضخمة (قد تكون حساب احتمالات) ـ فأدمغتنا إذاً وعقولنا يجب أن تفهم بدلالة مثل هذه الحسابات وحدها. وقد يكون ممكناً لهذه الحسابات، حين تصبح خارقة في تعقيدها أن تبدأ باتخاذ شكل أكثر شاعرية، أو صفات أكثر ذاتية، نرفقها بالتعبير "عقل". ومع ذلك يشق علينا أن نتجنب شعوراً مزعجاً بأن هناك دائماً شيئاً مفقوداً من هذه الصورة.

ولقد حاولت في حججي أن أدعِّم وجهة النظر التي تقول إن هناك حتماً شيئاً مفقوداً من الصورة الحاسوبية البحتة. ومع ذلك لا يزال الأمل يحدوني بأنه عن طريق العلم والرياضيات لا بد أن يبرز إلى النور أخيراً بعض التقدم العميق في فهمنا للعقل. ولكن قد يبدو لكم هنا أننا على كلا الوجهين في مأزق، غير أني حاولت أن أثبت أن هناك مخرجاً أصيلاً منه، لأن قابلية الحساب ليست على الإطلاق هي الشيء نفسه مثلها مثل التحديد الرياضي الدقيق *. وفي عالم أفلاطون الرياضي الدقيق من الغموض والجمال على قدر ما يمكن للمرء أن يتمنى، ولا تحتل الخوارزميات والحسابات إلا جزءاً محدوداً منه بالمقارنة مع الجزء الآخر الذي يحتوي مفاهيم تتضمن معظم هذا الغموض.

ولما كان الشعور، كما يبدو لي، ظاهرة مهمة نتعرف بها على وجود الكون نفسه، لذلك لا أستطيع، وبكل بساطة، أن أصدق بأنه مجرد شيء حدث "مصادفة" نتيجة لحساب معقد. وهنا قد يحتج أحدكم بأن الكون الذي تحكمه قوانين لا تدع مجالاً لظهور الشعور هو ليس كوناً على الإطلاق. وأنا أضيف إلى ذلك أيضاً: يجب أن تفشل في هذا المعيار [أي عند غياب الشعور] جميع الأوصاف الرياضية للكون التي قُدِّمت إلينا حتى الآن وأن ظاهرة الشعور وحدها هي التي تستطيع أن تستحضر كوناً "نظرياً" افتراضياً في صورة وجود حقيقي.

قد تبدو بعض الحجج التي قدمتها في هذه الفصول ملتوية معقدة وبعضها، بلا جدال، تأمل وتخمين، أما بعضها الآخر فليس لنا منه، كما أعتقد، مفر حقيقي. هذا فضلاً عن أننا نشعر مع هذه

---

* فقد يكون الشيء محدداً رياضياً بدقة ولكنه غير قابل للحساب.

الأساليب كلها بأن العقل الواعي لا يمكن، كما هو واضح، أن يعمل كالحاسوب، حتى وإن كان الكثير مما يستخدم في النشاط العقلي يمكن أن يعمل كذلك.

إن هذا الوضوح الذي توصلنا إليه هو من نوع *الوضوح* الذي يمكن أن يراه طفل ـ على الرغم من أن هذا الطفل يمكن أن يجبر في حياته القادمة على الاعتقاد بأن القضايا الواضحة هي "قضايا زائفة" ينبغي البرهان على عدم وجودها عن طريق الاستدلالات *المتأنية* والاختيار الحاذق للتعاريف. إذ يرى الأطفال الأشياء بوضوح في بعض الأحيان ثم تصبح غامضة في حياتهم القادمة، ونحن غالباً ما ننسى الدهشة التي كنا نشعر بها ونحن أطفال عندما بدأت هموم فعاليات "العالم الواقعي" تلقي بثقلها على عاتقنا، إذ لا يحجم الأطفال عن طرح أسئلة أساسية قد يربكنا نحن البالغين أن نوجهها. فمثلاً: ما الذي يحدث لتيار الشعور عند كل منا بعد موته، وأين كان قبل أن يولد، هل نستطيع أن نصبح، أو كنا، شخصاً آخر، ولماذا ندرك أصلاً، ولماذا نحن موجودون، ولماذا يوجد أصلاً كون ونستطيع نحن أن نوجد فيه فعلاً؟ إنها معضلات تراود كلاً منا عند يقظة وعيه ـ بل لا شك أنها رافقت، في داخل أي مخلوق كان أو كائن آخر، يقظة الوعي الذاتي الأصيل منذ البدء.

وأنا نفسي أذكر أني أصبت بالحيرة وأنا طفل من معضلات عديدة من هذا النوع، بل لربما أمكن لشعوري الخاص أن يستبدل بشعور شخص آخر.فكيف يمكنني أن أعرف ان هذا التبدل لم يتح له أن يحدث قبل ذلك ـ هذا مع افتراضي بأن الفرد منا لا يحمل سوى الذكريات الوثيقة الصلة به بوجه خاص؟ فكيف يمكنني أن أشرح تجربة التبدل هذه لشخص آخر؟ وهل تعني حقاً شيئاً ما؟ فلربما كنت أعيش تجربة الدقائق العشر نفسها مرة بعد مرة، ومع الادراكات نفسها بالضبط في كل مرة؟ ولربما كانت اللحظة الحاضرة وحدها هي "الموجودة" بالنسبة لي. بل ربما كانت "أنا" الغد، أو البارحة، هي حقاً شخصاً مختلفاً كل الاختلاف وله شعور مستقل. أو ربما كنت أعيش في الحقيقة تراجعياً إلى الوراء في الزمان مع تيار شعوري المتجه نحو الماضي. وهكذا تنبئني ذاكرتي فعلاً ماالذي سيحدث لي بدلاً مما حدث لي ـ وهكذا فإن تجربة مؤلمة في المدرسة هي شيء ينتظرني، وأنا، لسوء طالعي، سأصادفها فعلاً عما قريب. وهل التمييز بين تلك الحياة التراجعية في الزمن، وتوالي تقدم الزمن الذي نشعر به عادة، "يعني" فعلاً شيئاً ما، ليصبح أحد الأمرين "خطأ" والآخر "صواباً"! إننا بحاجة إلى نظرية في الشعور لكي تصبح إجابتنا عن هذه الاسئلة قابلة مبدئياً للحل ولكن، يظل السؤال المطروح: كيف لأحدنا أن يبدأ، حتى بشرح جوهر مثل هذه القضايا، لكيان† لم يسبق له هو نفسه أن ملك الشعور.....!

---

† تلميح إلى الحاسوب

الملاحظات

1 - رأينا في الفصل الرابع (ص156) أن التحقق في نظام شكلي (أو صوري) من صحة برهان ما، يتم دائماً بصورة خوارزمية، وبالعكس، إن كل خوارزمية تساعد على التوصل إلى حقائق رياضية، يمكن إضافتها إلى مجموعة البديهيات وقواعد الاستدلال في المنطق العادي (حساب المحمولات) وذلك لكي نحصل على نظام صوري جديد نحصل منه أيضاً على حقائق رياضية.

لا شك في أن الرياضيين يرتكبون أحياناً بعض الأخطاء. ويبدو أن هذا هو *الوضع* الذي تكمن فيه، في رأي تورنغ، "نقطة ضعف" الحجج من الطراز الغودلي المرفوعة في وجه الفكرة القائلة إن الفكر الإنساني خوارزمي. ولكن يبدو لي أنه من المستبعد أن تكون في قابلية الإنسان لارتكاب الخطأ دلالة على البصيرة (بل يمكن، وبكل معنى الكلمة، محاكاة "مولدات الأعداد العشوائية" بطريقة خوارزمية).

2 - قد يندهش بعض القراء من وجود وجهات نظر مختلفة فعلاً بين الرياضيين. ولكن لنذكر هنا المناقشة الواردة في الفصل الرابع. ومهما يكن من أمر، فإن الخلافات، أينما وجدت، لا تحتاج منا هنا لعناية كبيرة. فهي ترجع إلى مشاكل تهم الاختصاصيين وتتعلق بالمجموعات الكبيرة جداً. في حين أننا نستطيع أن نركز انتباهنا على بعض الدعاوي في الحساب مع عدد منته من مكممات الوجود والشمول، [مثال: يوجد على الأقل، ومهما يكن] وعندئذ تنطبق عليها مناقشتنا السابقة (وربما كان قولنا هذا يبالغ بعض الشيء في هذه الحالة لأن مبدأ الانعكاس الخاص بالمجموعات اللامنتهية يمكن أن يستخدم أحياناً للوصول إلى دعاوٍ في الحساب). أما بالنسبة لأشد المتعصبين للصورية، المتحصن ضد غودل، الذي يصرح بأنه لا يعترف حتى بوجود حقيقة رياضية من هذا القبيل، فسوف أتجاهله ببساطة ما دام لا يمتلك كما يبدو صفة الحقيقة الإلهية التي تدور المناقشة كلها حولها!

3 - لم يصبح استخدام التعبير "ثقب أسود" شائعاً إلا في زمن متأخر جداً، وحول العام 1968 (ويرجع ذلك في معظمه إلى أفكار الفيزيائي الاميركي ويلر John A.Wheeler النبوئية).

4 - يبدو لي أن حاجة الحيوانات إلى النوم، الذي يظهر عليهم فيه أحياناً أنهم يحلمون (وهذا ما يلاحظ غالباً عند الكلاب) هو دليل بأنهم يستطيعون أن يملكوا الشعور. لأن وجود نوع من الشعور، كما يبدو، هو أحد المقومات الأساسية للتمييز بين نوم الأحلام والنوم من دون أحلام.

5 - في حالة النسبية الخاصة أو العامة، إقرأ بدلاً من "الأزمنة" : " الفضاءات المتزامنة" أو السطوح الشبيهة بالفضائية" (الصفحتان 246 و 261).

6 - وبرغم ذلك يوجد مخرج في حالة كون ذي فضاء لامتناه، لأنه سيثبت عندئذ في النهاية (كما في حالة العوالم المتعددة بالأحرى) أنه سيكون ثمة عدد غير منته من النسخ من الشخص نفسه ومن

محيطه المباشر، ويمكن أن يكون سلوك كل نسخة في المستقبل مختلفاً إختلافاً ضئيلاً عن الآخر، فلن يستطيع الشخص أن يكون على يقين تام في معرفة أي من النسخ التقريبية لهذا الشخص المنمذج في الرياضيات يمكن أن تكون "هو".

7 - وحتى البلورات الحقيقية يمكن أن ينطوي نمو بعضها على مسائل مشابهة. من ذلك مثلاً حين تتضمن الخلية التي تؤلف الوحدة الأساسية عدة مئات من الذرات، كما هو الحال فيما يدعي أطوار فرانك - كاسبر Franck - Casper. ولابد لنا من أن نذكر أيضاً إلى جانب ذلك أن Socolar وOnoda و Di Vincenzo و Stienhardt اقترحوا عام 1988 طريقة نظرية "شبه محلية" (وإن تكن لا تزال غير محلية) لنمو أشباه بلورات خماسية التناظر.

خاتمـــــــة

قـال كبير المصممين "....أن يكـون شـعور.....؟ آه،.....إنـه أهم سؤال، يـابني.....الــ.....الأحـرى كأني سأعرف الإجابة عنه بنفسي،......دعونا نرى مـا الـذي لـدى صديقنـا ليقولـه عـن ....هـذا غريـب.........الــ........يقول أولـترونيك إنــه لا يـرى مـا ......فهو لا يستطيع حتـى أن يفهـم مـا قصدك " وتحولـت همهمـات الضحك فـي أرجـاء القاعـة إلى قهقهات صاخبة.

شـعر آدم بحـدة أنـه محـرج، فقد كـان بإمكــانهم أن يفعلوا أي شيء إلا أن يضحكوا.

المراجـــع

Aharonov, Y. and Albert, D. Z. (1981). Can we make sense out of the measurement process in relativisitic quantum mechanics? *Phys. Rev.*, **D24**, 359–70.

Aharonov, Y., Bergmann, P., and Lebowitz, J. L. (1964). Time symmetry in the quantum process of measurement. In *Quantum theory and measurement* (ed. J. A. Wheeler and W. H. Zurek), Princeton University Press, 1983; originally in *Phys. Rev.*, **134B**, 1410–16.

Ashtekar, A., Balachandran, A. P., and Sang Jo (1989). The CP problem in quantum gravity. *Int. J. Mod. Phys.*, **A6**, 1493–514.

Aspect, A. and Grangier, P. (1986). Experiments on Einstein–Podolsky–Rosen-type correlations with pairs of visible photons. In *Quantum concepts in space and time* (ed. R. Penrose and C. J. Isham), Oxford University Press.

Atkins, P. W. (1987). *Why mathematics works.* Oxford University Extension Lecture in series: Philosophy and the New Physics (13 March).

Barbour, J. B. (1989). *Absolute or relative motion?* Volume 1: *The discovery of dynamics.* Cambridge University Press, Cambridge.

Barrow, J. D. (1988). *The world within the world.* Oxford University Press.

Barrow, J. D. and Tipler, F. J. (1986). *The anthropic cosmological principle.* Oxford University Press.

Baylor, D. A., Lamb, T. D., and Yau, K.-W. (1979). Responses of retinal rods to single photons. *J. Physiol.*, **288**, 613–34.

Bekenstein, J. (1972). Black holes and entropy. *Phys. Rev.*, **D7**, 2333–46.

Belinfante, F. J. (1975). *Measurement and time reversal in objective quantum theory.* Pergamon Press, New York.

Belinskii, V. A., Khalatnikov, I. M., and Lifshitz, E. M. (1970). Oscillatory approach to a singular point in the relativistic cosmology. *Adv. Phys.* **19**, 525–73.

Bell, J. S. (1987). *Speakable and unspeakable in quantum mechanics.* Cambridge University Press.

Benacerraf, P. (1967). God, the Devil and Gödel. *The Monist*, **51**, 9–32.

Blakemore, C. and Greenfield, S. (eds.) (1987). *Mindwaves: thoughts on intelligence, identity and consciousness.* Basil Blackwell, Oxford.

Blum, L., Shub, M., and Smale, S. (1989). On a theory of computation and complexity over the real numbers: NP completeness, recursive functions and universal machines. *Bull. Amer. Math. Soc.*, **21**, 1–46.

Bohm, D. (1951). The paradox of Einstein, Rosen and Podolsky. In *Quantum theory and measurement* (ed. J. A. Wheeler and W. H. Zurek), Princeton University Press, 1983; originally in *Quantum theory*, D. Bohm, Ch. 22, sect. 15–19. Prentice-Hall, Englewood-Cliffs.

Bohm, D. (1952). A suggested interpretation of the quantum theory in terms of 'hidden' variables, I and II, in *Quantum theory and measurement* (ed. J. A. Wheeler and

W. H. Zurek), Princeton University Press, 1983; originally in *Phys. Rev.*, **85**, 166–93.

Bondi, H. (1960). Gravitational waves in general relativity. *Nature (London)*, **186**, 535.

Bowie, G. L. (1982). Lucas' number is finally up. *J. of Philosophical Logic*, **11**, 279–85.

Brooks, R. and Matelski, J. P. (1981), The dynamics of 2-generator subgroups of PSL(2,C), Riemann surfaces and related topics: *Proceedings of the 1978 Stony Brook Conference*, edited by I. Kra and B. Maskit, *Ann. Math Studies*, **97**. Princeton University Press, Princeton.

Cartan, É. (1923). Sur les variétés à connexion affine et la théorie de la relativité généralisée. *Ann. Sci. Ec. Norm. Sup.*, **40**, 325–412.

Chandrasekhar, S. (1987). *Truth and beauty: aesthetics and motivations in science.* University of Chicago Press.

Church, A. (1941). *The calculi of lambda-conversion.* Annals of Mathematics Studies, no. 6. Princeton University Press.

Churchland, P. M. (1984). *Matter and consciousness.* Bradford Books, MIT Press, Cambridge, Mass.

Clauser, J. F., Horne, A. H., Shimony, A., and Holt, R. A. (1969). Proposed experiment to test local hidden-variable theories. In *Quantum theory and measurement* (ed. J. A. Wheeler and W. H. Zurek), Princeton University Press, 1983; originally in *Phys. Rev. Lett.*, **23**, 880–4.

Close, F. (1983). *The cosmic onion: quarks and the nature of the universe.* Heinemann, London.

Cohen, P. C. (1966). *Set theory and the continuum hypothesis.* Benjamin, Menlo Park, CA.

Cutland, N. J. (1980). *Computability: an introduction to recursive function theory.* Cambridge University Press.

Davies, P. C. W. (1974). *The physics of time-asymmetry.* Surrey University Press.

Davies, P. C. W. and Brown, J. (1988). *Superstrings: a theory of everything?* Cambridge University Press.

Davies, R. D., Lasenby, A. N., Watson, R. A., Daintree, E. J., Hopkins, J., Beckman, J., Sanchez-Almeida, J., and Rebolo, R. (1987). Sensitive measurement of fluctuations in the cosmic microwave background. *Nature*, **326**, 462–5.

Davis, M. (1988). Mathematical logic and the origin of modern computers. In *The universal Turing machine: a half-century survey* (ed. R. Herken), Kammerer & Unverzagt, Hamburg.

Dawkins, R. (1986). *The blind watchmaker.* Longman, London.

de Broglie, L. (1956). *Tentative d'interprétation causale et nonlinéaire de la mécanique ondulatoire.* Gauthier-Villars, Paris.

Deeke, L., Grötzinger, B., and Kornhuber, H. H. (1976). Voluntary finger movements in man: cerebral potentials and theory. *Biol. Cybernetics*, **23**, 99.

Delbrück, M. (1986). *Mind from matter?* Blackwell Scientific Publishing, Oxford.

Dennett, D. C. (1978). *Brainstorms.* Philosophical Essays on Mind and Psychology, Harvester Press, Hassocks, Sussex.

Deutsch, D. (1985). Quantum theory, the Church–Turing principle and the universal quantum computer. *Proc. Roy. Soc. (Lond.)*, **A400**, 97–117.

Devlin, K. (1988). *Mathematics: the new golden age*. Penguin Books, London.
De Witt, B. S. and Graham, R. D. (eds.) (1973). *The many-worlds interpretation of quantum mechanics*. Princeton University Press.
Dirac, P. A. M. (1928). The quantum theory of the electron. *Proc. Roy. Soc. (Lond.)*, **A117**, 610–24; *ditto*, part II, *ibid.*, **A118**, 361.
Dirac, P. A. M. (1938). Classical theory of radiating electrons. *Proc. Roy. Soc. (Lond.)*, **A167**, 148.
Dirac, P. A. M. (1939). The relations between mathematics and physics. *Proc. Roy. Soc., Edinburgh*, **59**, 122.
Dirac, P. A. M. (1947). *The principles of quantum mechanics* (3rd edn). Oxford University Press.
Dirac, P. A. M. (1982). Pretty mathematics. *Int. J. Theor. Phys.*, **21**, 603–5.
Drake, S. (trans.) (1953). *Galileo Galilei: dialogue concerning the two chief world systems—Ptolemaic and Copernican*. University of California, Berkeley, 1953.
Drake, S. (1957). *Discoveries and opinions of Galileo*. Doubleday, New York.
Eccles, J. C. (1973). *The understanding of the brain*. McGraw-Hill, New York.
Einstein, A., Podolsky, B., and Rosen, N. (1935). Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete? In *Quantum theory and measurement* (ed. J. A. Wheeler and W. H. Zurek), Princeton University Press, 1983; originally in *Phys. Rev.*, **47**, 777–80.
Everett, H. (1957). 'Relative state' formulation of quantum mechanics. In *Quantum theory and measurement* (ed. J. A. Wheeler and W. H. Zurek), Princeton University Press, 1983; originally in *Rev. of Mod. Phys.*, **29**, 454–62.
Feferman, S. (1988). Turing in the Land of O(z). In *The universal Turing machine: a half-century survey* (ed. R. Herken), Kammerer & Unverzagt, Hamburg.
Feynman, R. P. (1985). *QED: the strange theory of light and matter*. Princeton University Press.
Feynman, R. P., Leighton, R. B., and Sands, M. (1965). *The Feynman Lectures*. Addison-Wesley.
Fodor, J. A. (1983). *The modularity of mind*. MIT Press, Cambridge, Mass.
Fredkin, E. and Toffoli, T. (1982). Conservative logic, *Int. J. Theor. Phys.*, **21**, 219–53.
Freedman, S. J. and Clauser, J. F. (1972). Experimental test of local hidden-variable theories. In *Quantum theory and measurement* (ed. J. A. Wheeler and W. H. Zurek), Princeton University Press, 1983; originally in *Phys. Rev. Lett.*, **28**, 938–41.
Galilei, G. (1638). *Diaglogues concerning two new sciences*. Macmillan edn 1914; Dover Inc.
Gandy, R. (1988). The confluence of ideas in 1936. In *The universal Turing machine: a half-century survey* (ed. R. Herken), Kammerer & Unverzagt, Hamburg.
Gardner, M. (1958). *Logic machines and diagrams*. University of Chicago Press.
Gardner, M. (1983). *The whys of a philosophical scrivener*. William Morrow and Co., Inc., New York.
Gardner, M. (1989). *Penrose tiles to trapdoor ciphers*. W. H. Freeman and Company, New York.
Gayle, F. W. (1987). Free-surface solidification habit and point group symmetry of a faceted icosahedral Al-Li-Cu phase. *J. Mater. Res.*, **2**, 1–4.

Gazzaniga, M. S. (1970). *The bisected brain.* Appleton-Century-Crofts, New York.
Gazzaniga, M. S., DeDoux, J. E., and Wilson, D. H. (1977). Language, praxis, and the right hemisphere: clues to some mechanisms of consciousness. *Neurology*, **27,** 1144–7.
Geroch, R. and Hartle, J. B. (1986). Computability and physical theories. *Found. Phys.*, **16,** 533.
Ghirardi, G. C., Rimini, A., and Weber, T. (1980). A general argument against superluminal transmission through the quantum mechanical measurement process. *Lett. Nuovo. Chim.*, **27,** 293–8.
Ghirardi, G. C., Rimini, A., and Weber, T. (1986). Unified dynamics for microscopic and macroscopic systems. *Phys. Rev.*, **D34,** 470.
Gödel, K. (1931). Über formal unentscheidbare Sätze der Principia Mathematica und verwandter Systeme 1. *Monatshefte für Mathematik und Physik*, **38,** 173–98.
Good, I. J. (1969). Gödel's theorem is a red herring. *Brit. J. Philos. Sci.*, **18,** 359–73.
Gregory, R. L. (1981). *Mind in science; A history of explanations in psychology and physics.* Weidenfeld and Nicholson Ltd.
Grey Walter, W. (1953). *The living brain.* Gerald Duckworth and Co. Ltd.
Grünbaum, B. and Shephard, G. C. (1981). Some problems on plane tilings. In *The mathematical Gardner* (ed. D. A. Klarner), Prindle, Weber and Schmidt, Boston.
Grünbaum, B. and Shephard, G. C. (1987). *Tilings and patterns.* W. H. Freeman.
Hadamard, J. (1945). *The psychology of invention in the mathematical field.* Princeton University Press.
Hanf, W. (1974). Nonrecursive tilings of the plane, I. *J. Symbolic Logic*, **39,** 283–5.
Harth, E. (1982). *Windows on the mind.* Harvester Press, Hassocks, Sussex.
Hartle, J. B. and Hawking, S. W. (1983). Wave function of the universe. *Phys. Rev.*, **D31,** 1777.
Hawking, S. W. (1975). Particle creation by black holes. *Commun. Math. Phys.*, **43,** 199–220.
Hawking, S. W. (1987). Quantum cosmology. In *300 years of gravitation* (ed. S. W. Hawking and W. Israel), Cambridge University Press.
Hawking, S. W. (1988). *A brief history of time.* Bantam Press, London.
Hawking, S. W. and Penrose, R. (1970). The singularities of gravitational collapse and cosmology. *Proc. Roy. Soc. (London)*, **A314,** 529–48.
Hebb, D. O. (1954). The problem of consciousness and introspection. In *Brain mechanisms and consciousness* (ed. J. F. Delafresnaye), Blackwell, Oxford.
Hecht, S., Shlaer, S., and Pirenne, M. H. (1941). Energy, quanta and vision. *J. of Gen. Physiol.*, **25,** 891–40.
Herken, R. (ed.) (1988). *The universal Turing machine: a half-century survey.* Kammerer & Unverzagt, Hamburg.
Hiley, B. J. and Peat, F. D. (eds.) (1987). *Quantum implications. Essays in honour of David Bohm.* Routledge and Kegan Paul, London & New York.
Hodges, A. P. (1983). *Alan Turing: the enigma.* Burnett Books and Hutchinson, London; Simon and Schuster, New York.
Hofstadter, D. R. (1979). *Gödel, Escher, Bach: an eternal golden braid.* Harvester Press, Hassocks, Sussex.
Hofstadter, D. R. (1981). A conversation with Einstein's brain. In *The mind's I* (ed.

D. R. Hofstadter and D. C. Dennett), Basic Books, Inc.; Penguin Books, Ltd., Harmondsworth, Middx.

Hofstadter, D. R. and Dennett, D. C. (eds.) (1981). *The mind's I.* Basic Books, Inc.; Penguin Books, Ltd., Harmondsworth, Middx.

Hubel, D. H. (1988). *Eye, brain and vision.* Scientific American Library Series #22.

Huggett, S. A. and Tod, K. P. (1985). *An introduction to twistor theory.* London Math. Soc. student texts, Cambridge University Press.

Jaynes, J. (1980). *The origin of consciousness in the breakdown of the bicameral mind.* Penguin Books Ltd., Harmondsworth, Middx.

Kandel, E. R. (1976). *The cellular basis of behaviour.* Freeman, San Francisco.

Károlyházy, F. (1974). Gravitation and quantum mechanics of macroscopic bodies. *Magyar Fizikai Folyólrat*, **12,** 24.

Károlyházy, F., Frenkel, A., and Lukács, B. (1986). On the possible role of gravity on the reduction of the wave function. In *Quantum concepts in space and time* (ed. R. Penrose and C. J. Isham), Oxford University Press.

Keene, R. (1988). Chess: Henceforward. *The Spectator*, **261,** (no. 8371), 52.

Knuth, D. M. (1981). *The art of computer programming*, Vol. 2 (2nd edn) Addison-Wesley, Reading, MA.

Komar, A. B. (1964). Undecidability of macroscopically distinguishable states in quantum field theory. *Phys. Rev.*, **133B,** 542–4.

Komar, A. B. (1969). Qualitative features of quantized gravitation. *Int. J. Theor. Phys.* **2,** 157–60.

Kuznetsov, B. G. (1977). *Einstein: Leben, Tod, Unsterblichkeit* (trans. into German by H. Fuchs). Birkhauser, Basel.

LeDoux, J. E. (1985). Brain, mind and language. In *Brain and mind* (ed. D. A. Oakley), Methuen, London and New York.

Levy, D. W. L. (1984). *Chess computer handbook.* Batsford.

Lewis, D. (1969). Lucas against mechanism. *Philosophy*, **44,** 231–3.

Lewis, D. (1989). Lucas against mechanism II. *Can. J. Philos.* **9,** 373–6.

Libet, B. (1987). Consciousness: Conscious subjective experience. In *Encyclopedia of neuroscience*, Vol. 1 (ed.) G. Adelman. Birkhauser; pp. 271–5.

Libet, B. (1989). Conscious subjective experience vs. unconscious mental functions: A theory of the cerebral process involved. In *Models of brain function* (ed. R. M. J. Cotterill), Cambridge University Press, Cambridge; pp. 35–43.

Libet, B., Wright, E. W. Jr., Feinstein, B., and Pearl, D. K. (1979). Subjective referral of the timing for a conscious sensory experience. *Brain*, **102,** 193–224.

Lorenz, K. (1972). Quoted in: *From ape to Adam* by H. Wendt, Bobbs Merrill, Indianapolis.

Lucas, J. R. (1961). Minds, machines and Gödel. *Philosohy*, **36,** 120–4; reprinted in Alan Ross Anderson (1964), *Minds and machines*, Englewood Cliffs.

MacKay, D. (1987). Divided brains—divided minds? In *Mindwaves* (ed. C. Blakemore and S. Greenfield), Basil Blackwell, Oxford.

Majorana, E. (1932). Atomi orientati in campo magnetico variabile. *Nuovo Cimento*, **9,** 43–50.

Mandelbrot, B. B. (1986). Fractals and the rebirth of iteration theory. In *The beauty of fractals: images of complex dynamical systems*, H.-O. Peitgen and P. H Richter, Springer-Verlag, Berlin; pp. 151–60.

Mandelbrot, B. B. (1989). Some 'facts' that evaporate upon examination. *Math. Intelligencer*, **11**, 12–16.
Maxwell, J. C. (1865). A dynamical theory of the electromagnetic field. *Philos. Trans. Roy. Soc. (Lond.)*, **155**, 459–512.
Mermin, D. (1985). Is the moon there when nobody looks? Reality and the quantum theory. *Physics Today*, **38** (no. 4), 38–47.
Michie, D. (1988). The fifth generation's unbridged gap. In *The universal Turing machine: a half-century survey* (ed. R. Herken), Kammerer & Unverzagt, Hamburg.
Minsky, M. L. (1968). Matter, mind, and models. In *Semantic information processing*. (ed. M. L. Minsky), MIT Press, Cambridge, Mass.
Misner, C. W. (1969). Mixmaster universe. *Phys. Rev. Lett.*, **22**, 1071–4.
Moravec, H. (1989). *Mind children: the future of robot and human intelligence*. Harvard University Press.
Moruzzi, G. and Magoun, H. W. (1949). Brainstem reticular formation and activation of the EEG. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, **1**, 455–73.
Mott, N. F. (1929). The wave mechanics of α-ray tracks. In *Quantum theory and measurement* (ed. J. A. Wheeler and W. H. Zurek), Princeton University Press, 1983; originally in *Proc. Roy. Soc. (Lond.)*, **A126**, 79–84.
Mott, N. F. and Massey, H. S. W. (1965). Magnetic moment of the electron. In *Quantum theory and measurement* (ed. J. A. Wheeler and W. H. Zurek), Princeton University Press, 1983; originally in *The theory of atomic collisions* by N. F. Mott and H. S. W. Massey (Clarendon Press, Oxford; 1965).
Myers, D. (1974). Nonrecursive tilings of the plane, II. *J. Symbolic Logic*, **39**, 286–94.
Myers, R. E. and Sperry, R. W. (1953). Interocular transfer of a visual form discrimination habit in cats after section of the optic chiasm and corpus callosum. *Anatomical Record*, **175**, 351–2.
Nagel, E. and Newman, J. R. (1958). *Gödel's proof.* Routledge & Kegan Paul Ltd.
Nelson, D. R. and Halperin, B. I. (1985). Pentagonal and icosahedral order in rapidly cooled metals. *Science*, **229**, 233.
Newton, I. (1687). *Principia*. Cambridge University Press.
Newton, I. (1730). *Opticks*. 1952, Dover, Inc.
Oakley, D. A. (ed) (1985). *Brain and mind.* Methuen, London and New York.
Oakley, D. A. and Eames, L. C. (1985). The plurality of consciousness. In *Brain and mind* (ed. D. A. Oakley), Methuen, London and New York.
O'Connell, K. (1988). Computer chess. *Chess*, **15**.
O'Keefe, J. (1985). Is consciousness the gateway to the hippocampal cognitive map? A speculative essay on the neural basis of mind. In *Brain and mind* (ed. D. A. Oakley), Methuen, London and New York.
Onoda, G. Y., Steinhardt, P. J., DiVincenzo, D. P., and Socolar, J. E. S. (1988). Growing perfect quasicrystals. *Phys. Rev. Lett.*, **60**, 2688.
Oppenheimer, J. R. and Snyder, H. (1939). On continued gravitational contraction. *Phys. Rev.* **56**, 455–9.
Pais, A. (1982). *'Subtle is the Lord . . .': the science and the life of Albert Einstein.* Clarendon Press, Oxford.
Paris, J. and Harrington, L. (1977). A mathematical incompleteness in Peano arith-

metic. In *Handbook of mathematical logic* (ed. J. Barwise), North-Holland, Amsterdam.
Pearle, P. (1985). 'Models for reduction'. In *Quantum concepts in space and time* (ed. C. J. Isham and R. Penrose), Oxford University Press.
Pearle, P. (1989). Combining stochastic dynamical state-vector reduction with spontaneous localization. *Phys. Rev. A*, **39**, 2277–89.
Peitgen, H.-O. and Richter, P. H. (1986). *The beauty of fractals.* Springer-Verlag, Berlin and Heidelberg.
Peitgen, H.-O. and Saupe, D. (1988). *The science of fractal images.* Springer-Verlag, Berlin.
Penfield, W. and Jasper, H. (1947). Highest level seizures. *Research Publications of the Association for Research in Nervous and Mental Diseases (New York)*, **26**, 252–71.
Penrose, R. (1965). Gravitational collapse and space-time singularities. *Phys. Rev. Lett.*, **14**, 57–9.
Penrose, R. (1974). The rôle of aesthetics in pure and applied mathematical research. *Bull. Inst. Math. Applications*, **10**, no. 7/8, 266–71.
Penrose, R. (1979*a*). Einstein's vision and the mathematics of the natural world. *The Sciences* (March), 6–9.
Penrose, R. (1979*b*). Singularities and time-asymmetry. In *General relativity: An Einstein centenary* (ed. S. W. Hawking and W. Israel), Cambridge University Press.
Penrose, R. (1987*a*). Newton, quantum theory and reality. In *300 years of gravity* (ed. S. W. Hawking and W. Israel), Cambridge University Press.
Penrose, R. (1987*b*). Quantum Physics and Conscious Thought. In *Quantum implications: Essays in honour of David Bohm* (ed. B. J. Hiley and F. D. Peat), Routledge and Kegan Paul, London & New York.
Penrose, R. (1989*a*). Tilings and quasi-crystals; a non-local growth problem? In *Aperiodicity and order 2* (ed. M. Jarič), Academic Press, New York.
Penrose, R. (1989*b*). Difficulties with inflationary cosmology. In the *Fourteenth Texas Symposium on Relativistic Astrophysics* (ed. E. J. Fenyves), NY Acad. Sci., New York, **571**, 249–64.
Penrose, R. and Rindler, W. (1984). *Spinors and space–time*, Vol. 1: *Two-spinor calculus and relativistic fields.* Cambridge University Press.
Penrose, R. and Rindler, W. (1986). *Spinors and space–time*, Vol. 2: *Spinor and twistor methods in space–time geometry.* Cambridge University Press.
Pour-El, M. B. and Richards, I. (1979). A computable ordinary differential equation which possesses no computable solution. *Ann. Math. Logic*, **17**, 61–90.
Pour-El, M. B. and Richards, I. (1981). The wave equation with computable initial data such that its unique solution is not computable. *Adv. in Math.*, **39**, 215–39.
Pour-El, M. B. and Richards, I. (1982). Noncomputability in models of physical phenomena. *Int. J. Theor. Phys.*, **21**, 553–5.
Pour-El, M. B. and Richards, I. (1989). *Computability in analysis and physics.* Springer-Verlag, New York.
Rae, A. (1986). *Quantum physics: illusion or reality?* Cambridge University Press.
Resnikoff, H. L. and Wells, R. O. Jr. (1973). *Mathematics and civilization.* Holt, Rinehart and Winston, Inc., New York, reprinted with additions, 1984, Dover Publications, Inc., Mineola, NY.

Rindler, W. (1977). *Essential relativity*. Springer-Verlag, New York.
Rindler, W. (1982). *Introduction to special relativity*. Clarendon Press, Oxford.
Robinson, R. M. (1971). Undecidability and nonperiodicity for tilings of the plane. *Invent. Math.*, **12**, 177–209.
Rouse Ball, W. W. (1892). Calculating prodigies. In *Mathematical recreations and essays*.
Rucker, R. (1984). *Infinity and the mind: the science and philosophy of the infinite*. Paladin Books, Granada Publishing Ltd., London (first published by Birkhauser Inc., Boston, Mass, 1982.).
Sachs, R. K. (1962). Gravitational waves in general relativity. VIII. Waves in asymptotically flat space-time. *Proc. Roy. Soc. London*, **A270**, 103–26.
Schank, R. C. and Abelson, R. P. (1977). *Scripts, plans, goals and understanding*. Erlbaum, Hillsdale, NJ.
Schrödinger, E. (1935). Die gegenwärtige Situation in der Quantenmechanik. *Naturwissenschaften*, **23**, 807–12, 823–8, 844–9. (Translation by J. T. Trimmer (1980). In *Proc. Amer. Phil. Soc.*, **124**, 323–38.) In *Quantum theory and measurement* (ed. J. A. Wheeler and W. H. Zurek), Princeton University Press, 1983.
Schrödinger, E. (1967). *'What is life?' and 'Mind and matter'*. Cambridge University Press.
Searle, J. (1980). Minds, brains and programs. In *The behavioral and brain sciences*, Vol. 3. Cambridge University Press, reprinted in *The mind's I* (ed. D. R. Hofstadter and D. C. Dennett), Basic Books, Inc., Penguin Books Ltd., Harmondsworth, Middx. 1981.
Searle, J. R. (1987). Minds and brains without programs. In *Mindwaves* (ed. C. Blakemore and S. Greenfield), Basil Blackwell, Oxford.
Shechtman, D., Blech, I., Gratias, D., and Cahn, J. W. (1984). Metallic phase with long-range orientational order and no translational symmetry. *Phys. Rev. Lett.*, **53**, 1951.
Smith, S. B. (1983). *The great mental calculators*. Columbia University Press.
Smorynski, C. (1983). 'Big' news from Archimedes to Friedman. *Notices Amer. Math. Soc.*, **30**, 251–6.
Sperry, R. W. (1966). Brain bisection and consciousness. In *Brain and conscious experience* (ed. J. C. Eccles), Springer, New York.
Squires, E. (1985). *To acknowledge the wonder*. Adam Hilger Ltd., Bristol.
Squires, E. (1986). *The mystery of the quantum world*. Adam Hilger Ltd., Bristol.
Tipler, F. J., Clarke, C. J. S., and Ellis, G. F. R. (1980). Singularities and horizons—a review article. In *General relativity and gravitation* (ed. A. Held), Vol. 2, pp. 97–206. Plenum Press, New York.
Treiman, S. B., Jackiw, R., Zumino, B., and Witten, E. (1985). *Current algebra and anomalies, Princeton series in physics*. Princeton University Press, Princeton, N.J.
Turing, A. M. (1937). On computable numbers, with an application to the Entscheidungsproblem. *Proc. Lond. Math. Soc. (serv. 2)*, **42**, 230–65; a correction **43**, 544–6.
Turing, A. M. (1939). Systems of logic based on ordinals. *P. Lond. Math. Soc.*, **45**, 161–228.
Turing, A. M. (1950). Computing machinery and intelligence. *Mind*, **59**, no. 236;

reprinted in *The mind's I* (ed. D. R. Hofstadter and D. C. Dennett), Basic Books, Inc.; Penguin Books, Ltd., Harmondsworth, Middx. 1981.
von Neumann, J. (1955). *Mathematical foundations of quantum mechanics.* Princeton University Press.
Waltz, D. L. (1982). Artificial intelligence. *Scientific American*, **247**, (4), 101–22.
Ward, R. S. and Wells, R. O. Jr. (1990). *Twistor geometry and field theory.* Cambridge University Press.
Weinberg, S. (1977). *The first three minutes: A modern view of the origin of the universe.* Andre Deutsch, London.
Weiskrantz, L. (1987). Neuropsychology and the nature of consciousness. In *Mindwaves* (ed. C. Blakemore and S. Greenfield), Blackwell, Oxford.
Westfall, R. S. (1980). *Never at rest*, Cambridge University Press.
Wheeler, J. A. (1983). Law without law. In *Quantum theory and measurement* (ed. J. A. Wheeler and W. H. Zurek), Princeton University Press, pp. 182–213.
Wheeler, J. A. and Feynman, R. P. (1945). Interaction with the absorber as the mechanism of radiation. *Revs. Mod. Phys.*, **17**, 157–81.
Wheeler, J. A. and Zurek, W. H. (eds.) (1983). *Quantum theory and measurement.* Princeton University Press.
Whittaker, E. T. (1910). *The history of the theories of aether and electricity.* Longman, London.
Wigner, E. P. (1960). The unreasonable effectiveness of mathematics. *Commun. Pure Appl. Math.*, **13**, 1–14.
Wigner, E. P. (1961). Remarks on the mind-body question. In *The scientist speculates* (ed. I. J. Good), Heinemann, London. Reprinted in E. Wigner (1967), *Symmetries and reflections*, Indiana University Press, Bloomington, and in *Quantum theory and measurement* (ed. J. A. Wheeler and W. H. Zurek), Princeton University Press, 1983.
Will, C. M. (1987). Experimental gravitation from Newton's *Principia* to Einstein's general relativity. In *300 years of gravitation* (ed. S. W. Hawking and W. Israel), Cambridge University Press.
Wilson, D. H., Reeves, A. G., Gazzaniga, M. S., and Culver, C. (1977). Cerebral commissurotomy for the control of intractable seizures. *Neurology*, **27**, 708–15.
Winograd, T. (1972). Understanding natural language. *Cognitive Psychology*, **3**, 1–191.
Wootters, W. K. and Zurek, W. H. (1982). A single quantum cannot be cloned. *Nature*, **299**, 802–3.

الدليل الألفبائي

ملاحظة: يدل الحرف "ح" بعد رقم الصفحة إلى ورود الكلمة أو المصطلح في الحاشية في أسفل تلك الصفحة.

هـذا الكتـاب

تستطيع الحواسيب اليوم أن تتغلب على أبرع لاعبي الشطرنج، وتتنبأ بالطقس، وتحل مسائل اقتصادية متشابكة، ومسائل رياضية معقدة.. وقد تساءل كثيرون: هل باستطاعة الحاسوب أن يحل يوماً ما محل عقل الإنسان؟

يجيب أنصار «الذكاء الاصطناعي القوي» عن هذا السؤال بـ «نعم» أما مؤلف هذا الكتاب، الفيزيائي اللامع روجر بنروز، فيحاول عبر عرض شائق لحالة العلم الراهنة أن يثبت أن في عقل الإنسان من القوى ما لايمكن لآلة أن تبلغها. ولإثبات وجهة نظره هذه، يعرض لنا طائفة رائعة من المواضيع تمتد من المنطق ونظرية النسبية وميكانيك الكم وعلم الكون والثقوب السوداء إلى فيزيولوجية الأعصاب والدماغ وعلم النفس المعرفي، فيناقش ما تلزمنا معرفته كي نصبح قادرين على حل مسألة قديمة/ حديثة هي مسألة «العقل والجسد» التي أعيت المفكرين عبر العصور. ويخلص أخيراً من ذلك إلى أنه لابد لنا من معرفة أعمق، وأبعد من نظرية الكم والنظرية النسبية، لكي نحاول أن نتتسم ملامح هذه النظرية الأعمق (ولقد حاول هو ذلك فعلاً)، فقد يكون فيها الحل.

وهكذا سيجد المهتمون بالثقافة العلمية والجوانب الفلسفية العامة، في هذا الكتاب الفذ، شيئاً جديداً وآفاقاً رحبة ربما لم يعهدوها أبداً. بل سيشعر القارئ بعد قراءة هذا الكتاب أنه جنى من المعرفة والثقافة ما يغنيه عن كثير من كتب العلم وربما الفلسفة.

علي مولا

المعهد العالي للعلوم التطبيقية والتكنولوجيا